

# ESTUDO METROLÓGICO PARA AVALIAÇÃO DE ADESIVOS UTILIZADOS NA INSTRUMENTAÇÃO DE SENSORES DE PRESSÃO BASEADOS EM REDE DE BRAGG

Reinaldo Merendaz da Rocha Júnior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Ilson Paranhos Pasqualino

Rio de Janeiro  
Abril de 2019

ESTUDO METROLÓGICO PARA AVALIAÇÃO DE ADESIVOS UTILIZADOS NA  
INSTRUMENTAÇÃO DE SENSORES DE PRESSÃO BASEADOS EM REDE DE  
BRAGG

Reinaldo Merendaz da Rocha Junior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

---

Prof. Ilson Paranhos Pasqualino, D. Sc.

---

Prof. Marcelo Igor Lourenço de Souza, D. Sc.

---

Dra. Bessie de Assumpção Ribeiro, D. Sc.

---

Dr. Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
ABRIL DE 2019

Rocha Junior, Reinaldo Merendaz

Estudo Metrológico para Avaliação de Adesivos Utilizados na Instrumentação de Sensores de Pressão Baseados em Rede de *Bragg*/ Reinaldo Merendaz da Rocha Junior – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIII, p. 76 : il.; 29,7 cm

Orientador: Ilson Paranhos Pasqualino

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Oceânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 54-56

1. Sensores de fibra óptica. 2. Adesivos. 3. Redes de *Bragg*. 4. Sensor de pressão. I. Pasqualino, Ilson Paranhos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título

## AGRADECIMENTOS

A meus pais, Reinaldo e Severina, pelo apoio. A minha irmã, Roberta. A minha noiva pelo companheirismo e apoio ao longo de minha vida, além de sua paciência em revisar e corrigir meus textos, pela paciência e motivação em momentos de baixa autoestima e momentos onde pensei em desistir do mestrado.

Ao Prof. Ilson Paranhos Pasqualino pela orientação no desenvolvimento de minha dissertação. A Bessie de Assumpção Ribeiro que me auxiliou e direcionou em diversas etapas deste trabalho, além de realizar a ponte entre o LTS e o LIF para tornar viável a execução de meus ensaios mecânicos.

Ao Prof. Ilson Paranhos Pasqualino e ao João Fabrício Machado de Castilho que me deram a chance de ingressar no Laboratório de Tecnologia Submarina (COPPE/UFRJ) no ano de 2007, onde fiz grandes amigos e pude desfrutar de grandes aprendizados e inúmeras vitórias.

Ao Prof. Theodoro Antoun Netto pela oportunidade de retornar ao LTS em mais um projeto de pesquisa. A Prof. Bianca e ao Prof. Marcelo Igor que acompanho desde que os mesmos eram alunos de doutorado na UFRJ.

Com carinho aos amigos do LTS: Flávio Edgar, Renan Lima, Willian Monteiro, Paulo Camara, Daniele Romão, Marcelo Martins, Marcelo Costa, Thales Gabriel, Elias e José Carlos.

Aos professores do programa que tive o prazer de contar em minha formação: Severino Fonseca da Silva Neto, Júlio Cyrino, Murilo Vaz e Segen Farid Estefen.

Ao Professor Marcelo M. Werneck por abrir as portas do Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) do Programa de Engenharia Elétrica, por sêder o interrogador óptico para que eu pudesse realizar os ensaios de minha dissertação..

À toda equipe do Laboratório de Tecnologia Submarina (COPPE/UFRJ): Marcos Pedreira, Juseverck, Hebert, Wulf, Roberto, Cristiane, Antônio Robson e Luciano Crespo.

Às secretárias do Programa de Engenharia Naval e Oceânica, Lucianita e Eloisa, pela dedicação e apoio prestados nos trâmites burocráticos para o andamento desta dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO METROLÓGICO PARA AVALIAÇÃO DE ADESIVOS UTILIZADOS NA  
INSTRUMENTAÇÃO DE SENSORES DE PRESSÃO BASEADOS EM REDE DE  
BRAGG

Reinaldo Merendaz da Rocha Junior

Abril/2019

Orientador: Ilson Paranhos Pasqualino

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho apresenta um estudo sobre as vantagens e o desempenho de sensores de deformação, baseado em redes de Bragg, quando aplicado em sensores utilizados na indústria do petróleo. Entre os benefícios da utilização dos sensores FBG's (Fiber Bragg Gratings), os que mais chamam a atenção são a alta sensibilidade, a baixa atenuação de sinal em instrumentos de medição localizados a longas distâncias e a imunidade à interferências eletromagnéticas.

Nesta dissertação foi estudado o comportamento dos adesivos pré-selecionados para serem utilizados no sensor de pressão e temperatura (P&T) desenvolvido. Amostras foram instrumentadas com as redes de Bragg e ensaiadas na máquina de ensaios mecânicos do Laboratório de Tecnologia Submarina (COPPE/UFRJ). Os resultados obtidos foram utilizados como parâmetros na realização das análises numéricas da membrana do sensor P&T, baseadas em elementos finitos, utilizando o software comercial ABAQUS.

Dentre os adesivos estudados, o que apresentou melhores resultados foi definido através dos ensaios cíclicos, além de definir a tensão máxima a ser atingida pela membrana do sensor através dos ensaios de tração. Este estudo teve como objetivo otimizar o dimensionamento do sensor, definindo a geometria que a membrana deve assumir, para que o mesmo possa trabalhar com segurança, sem que ocorram deformações plásticas do material e/ou problemas na instrumentação das redes de *Bragg*.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

METROLOGICAL STUDY FOR EVALUATION OF ADHESIVES USED IN THE  
INSTRUMENTATION OF FIBER BRAGG GRATING PRESSURE SENSORS.

Reinaldo Merendaz da Rocha Junior

April/2019

Advisor: Ilson Paranhos Pasqualino

Department: Oceanic Engineering

In this work, a study on the advantages and performance of Fiber Bragg Gratings (FBGs), when applied to sensors used in the petroleum industry. Among the benefits of using FBG's, the most attractive are high sensitivity, low signal loss in distant instrumentations and immunity to electromagnetic interference.

In this dissertation the behavior of the preselected adhesives to be used in the pressure and temperature sensor (P&T) was studied. Samples were instrumented with the FBGs and tested in a mechanical testing machine. The results were used as parameters in the numerical and experimental analysis of the P&T sensor membrane, based on finite elements using commercial ABAQUS software.

Among the adhesives studied, the one that presented the best results was defined through the cyclic tests, the maximum tension of the sensor membrane was defined by the tensile tests. This study define de best geometry that the membrane must assume, so that it can work safely, without causing plastic deformations of the material or problems in the instrumentation of the FBG.

## Sumário

1. Introdução .....	1
2. Revisão bibliográfica .....	4
2.1. Unidades de medida .....	4
2.1.1. Instrumentos de medição .....	6
2.2. Medidores de deformação .....	6
2.2.1. Strain Gages [5] .....	6
2.2.2. Fibra óptica .....	9
2.2.2.1. Rede de <i>Bragg</i> .....	9
2.3. Sistema de monitoramento de pressão e temperatura .....	11
2.3.1. Sensor P&T .....	12
2.3.1.1. Adesivos .....	13
2.4. Erros e incertezas .....	14
2.4.1. Tipos de erros .....	15
2.4.2. Incertezas de medição .....	16
2.4.2.1. Incerteza Combinada .....	19
2.4.2.2. Grau de liberdade efetivo .....	19
2.4.2.3. Fator de abrangência .....	20
2.4.2.4. Incerteza expandida .....	20
3. Materiais e métodos .....	21
3.1. Material .....	21
3.2. Metodologia experimental .....	22
3.2.1. Ensaio de tração .....	23
3.2.2. Ensaio cíclico .....	25
4. Resultados experimentais .....	33
4.1. Ensaio de tração .....	33
4.2. Ensaio cíclico .....	37
5. Modelo numérico .....	45
5.1. Simulação numérica .....	45

<b>5.1.1. Interações, restrições e condições de contorno .....</b>	<b>46</b>
<b>5.1.2. Carregamento aplicado .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1.3. Malha de Elementos Finitos .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1.4. Resultados.....</b>	<b>49</b>
<b>6. Conclusões.....</b>	<b>51</b>
<b>6.1. Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>53</b>
<b>7. Referências Bibliográficas.....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO I – Ensaio de tração.....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO II – Ensaio cíclico .....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO III – Resultados do Modelo de Elementos Finitos .....</b>	<b>74</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Prospecção de derivados do petróleo ao longo do tempo realizado pela Petrobras .....	2
Figura 2: Composição de um strain gage .....	7
Figura 3: Ponte de Wheatstone .....	8
Figura 4: Um quarto de ponte .....	8
Figura 5: Representação esquemática de uma fibra óptica com uma FBG gravada em seu núcleo .....	10
Figura 6: Foto do primeiro modelo do sensor P&T .....	13
Figura 7: Dimensões de CP's de acordo com a norma ASTM E8M [18] .....	21
Figura 8: Corpos de prova para ensaio de tração .....	24
Figura 9: Rede de Bragg tensionada para instrumentação .....	26
Figura 10: Instrumentação do lado X dos CPs com as redes de Bragg e os adesivos selecionados .....	28
Figura 11: Continuação da instrumentação dos CPs com as redes de Bragg e os adesivos selecionados .....	29
Figura 12: Interrogador Óptico – Modelo: sm125 – Micron Optics .....	30
Figura 13: Sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios de tração .....	34
Figura 14: Máquina servohidráulica INSTRON 8800 .....	35
Figura 15: Desenho da membrana do sensor .....	46
Figura 16: Condições de simetria no eixo x (a), no eixo z (b) .....	47
Figura 17: Condições de contorno de apoio .....	47
Figura 18: Carregamento de pressão no modelo numérico .....	48
Figura 19: Malha de elementos finitos do selo do sensor óptico .....	49
Figura 20: Resultados do carregamento de temperatura em termos de tensões de Mises resultantes (em MPa) .....	74
Figura 21: Resultados do carregamento de pressão em termos de tensões de Mises resultantes (em MPa) .....	74
Figura 22: Resultados para o carregamento de temperatura e pressão em termos de tensões de Mises resultantes (em MPa) .....	75

Figura 23: Resultados para o carregamento de temperatura em termos de deformações logarítmicas totais (LE33) .....	75
Figura 24: Resultados para o carregamento de pressão em termos de deformações logarítmicas totais (LE33) .....	76
Figura 25: Resultados para o carregamento de temperatura e pressão em termos de deformações logarítmicas totais (LE33) .....	76

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Unidades base de medida segundo o SI [4] .....	5
Tabela 2: Especificações técnicas dos adesivos .....	13
Tabela 3: Especificações técnicas dos adesivos utilizados .....	14
Tabela 4: Mapeamento dos CP's .....	22
Tabela 5: Propriedades nominais dos materiais .....	23
Tabela 6: Tensionamento das redes durante a instrumentação .....	26
Tabela 7: Comprimento de onda das redes de Bragg antes da instrumentação .....	30
Tabela 8: Identificação dos corpos de prova instrumentados .....	31
Tabela 9: Programação de teste .....	32
Tabela 10: Temperaturas de teste .....	32
Tabela 11: Especificação dos strain gages utilizados .....	33
Tabela 12: Propriedades mecânicas dos CPs .....	37
Tabela 13: Correlação dos dados obtidos nos ensaios com os adesivos .....	40
Tabela 14: Sensibilidade das redes de Bragg a tensão .....	41
Tabela 15: Sensibilidade das redes de Bragg a temperatura .....	41
Tabela 16: Análise estatística dos resultados obtidos – P250 .....	42
Tabela 17: Análise estatística dos resultados obtidos – M-Bond 610 .....	43
Tabela 18: Análise estatística dos resultados das FBG's comparados ao Strain Gage .....	44
Tabela 19: Resultados das variáveis de interesse para as geometrias do selo analisadas .....	50

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva tensão-deformação do CP-01 .....	57
Gráfico 2: Curva tensão-deformação do CP-02 .....	57
Gráfico 3: Curva tensão-deformação do CP-03 .....	58
Gráfico 4: Curva tensão-deformação do CP-10 .....	58
Gráfico 5: Curva tensão-deformação do CP-11 .....	59
Gráfico 6: Curva tensão-deformação do CP-12 .....	59
Gráfico 7: Curva tensão-deformação do CP-07 .....	60
Gráfico 8: Curva tensão-deformação do CP-08 .....	60
Gráfico 9: Curva tensão-deformação do CP-09 .....	61
Gráfico 10: Determinação do coeficiente de Poisson – Inconel 625 .....	61
Gráfico 11: Determinação do módulo de elasticidade do material – Inconel 625 .....	62
Gráfico 12: Determinação do coeficiente de Poisson – Inconel 718 .....	62
Gráfico 13: Determinação do módulo de elasticidade do material – Inconel 718 .....	63
Gráfico 14: Resultados experimentais do CP-04 – P250 + Loctite 401 .....	64
Gráfico 15: Resultados experimentais da FBG1 – P250 .....	64
Gráfico 16: Resultados experimentais da FBG2 – Loctite 401 .....	65
Gráfico 17: Correlação dos dados experimentais da FBG1 – P250 .....	65
Gráfico 18: Correlação dos dados experimentais da FBG2 – Loctite 401 .....	66
Gráfico 19: Resultados experimentais do CP-05 – Loctite 4090 .....	66
Gráfico 20: Resultados experimentais do CP-05 – P250 .....	67
Gráfico 21: Resultados experimentais da FBG1 – Loctite 4090 .....	67
Gráfico 22: Resultados experimentais da FBG2 – P250 .....	68
Gráfico 23: Correlação dos dados experimentais da FBG1 – Loctite 4090 .....	68
Gráfico 24: Correlação dos dados experimentais da FBG2 – P250 .....	69
Gráfico 25: Resultados experimentais do CP-04 – P250 + M-Bond 610 .....	69
Gráfico 26: Resultados experimentais da FBG1 – P250 .....	70
Gráfico 27: Resultados experimentais da FBG2 – M-Bond 610 .....	70
Gráfico 28: Correlação dos dados experimentais da FBG1 – P250 .....	71

Gráfico 29: Correlação dos dados experimentais da FBG2 – M-Bond 610 .....	71
Gráfico 30: Correlação dos dados experimentais a temperatura de 20 °C .....	72
Gráfico 31: Correlação dos dados experimentais a temperatura de 50 °C .....	72
Gráfico 32: Correlação dos dados experimentais a temperatura de 100 °C .....	73
Gráfico 33: Correlação dos dados experimentais a temperatura de 150 °C .....	73

# Capítulo I

## 1. Introdução

A Agência Nacional do Petróleo (ANP), criada pela Lei Federal nº 9.478, de 06 de agosto de 1997, juntamente com o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro), criado pela Lei Federal nº 5.966, de 11 de dezembro de 1973, instituiu através da Portaria Conjunta nº 1, de 19 de junho de 2000, o Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural [1].

A Portaria Conjunta nº 1 estabelece as condições mínimas que devem ser atendidas pelo sistema de produção de petróleo e gás natural do país. Este regulamento é aplicado a todos os sistemas que possuam equipamentos destinados a medir, indicar e computar o volume de petróleo e gás natural produzido, processado, armazenado ou transportado, utilizados para a: (i) medição fiscal da produção nas instalações (*onshore* e *offshore*); (ii) medição da produção em testes de longa duração dos campos de petróleo e gás natural; (iii) medição para apropriação da produção dos poços e campos; (iv) medição da produção em testes de poços, cujos resultados sejam utilizados para apropriação da produção aos campos e poços; (v) medição operacional para controle de produção de um campo; (vi) medição operacional na entrada e saída das unidades de processamento de gás natural; (vii) medição operacional para controle da movimentação no transporte e estocagem de petróleo e gás natural; (viii) medição operacional nas importações e exportações de petróleo e gás natural.

Para atender as exigências da Portaria nº 1, os sistemas de medição de vazão devem ser constituídos de medidores de vazão do tipo deslocamento positivo, turbina, ou medidores mássicos tipo coriolis, com indicação de volume sem dispositivo de retorno a zero, um sistema de medição de temperatura e um sistema de medição de pressão. Os sistemas de medição de petróleo devem ser projetados, instalados e calibrados para operar dentro da classe de exatidão 0,3 % do valor medido, conforme OIML R117 [2].

Sistemas de medição de vazão na indústria do petróleo são instalados nas unidades de produção e são verificados periodicamente pela ANP, que realiza a validação dos volumes de produção declarados pelos operadores nos Boletins Mensais de Produção (BMP) e verifica o correto funcionamento dos instrumentos de medição.

Com a exploração do petróleo em águas cada vez mais profundas (Figura 1), novas tecnologias vem sendo desenvolvidas para tornar mais eficiente e diminuir os custos com sua exploração. A exploração de petróleo em águas profundas e ultra-

profundas apresenta grande dificuldade no que diz respeito ao controle e monitoramento dos poços, o tempo de resposta no acionamento de válvulas submarinas e a perda ou demora no recebimento de sinal de um instrumento de medição, são problemas apresentados neste cenário.

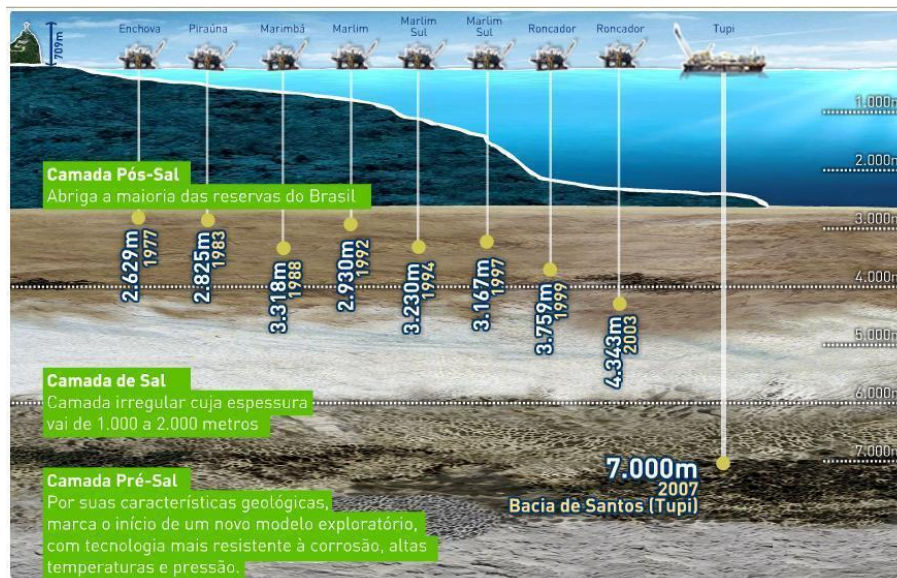


Figura 1: Prospecção de derivados do petróleo ao longo do tempo realizado pela Petrobras.

Válvulas submarinas para aplicações em águas profundas e ultra-profundas foram desenvolvidas para trabalhar com sistemas de controle eletro-hidráulico utilizados no sistema de controle principal do “Template-Manifold” de Bonito-Enchova, com sistemas de controle eletro-hidráulico multiplexado utilizados nas Árvores de Natal Molhadas (ANM’s) de Mexilhão e sistemas de controle elétrico utilizados no sistema de injeção de água de Albacora. O avanço no desenvolvimento dos sistemas de controle diminuem o tempo de resposta na atuação dos equipamentos e das válvulas submarinas, o que possibilita realizar as intervenções nos reservatórios de petróleo com mais segurança.

Segundo UDD & SPILLMAN (2011) [3], os sensores ópticos apresentam vantagens em relação aos sensores eletrônicos convencionais, o que promoveu sua entrada no mercado. Sensores de fibra óptica são imunes à interferência eletromagnética, um ganho em relação aos sensores eletrônicos convencionais que geralmente necessitam de blindagem, o que aumenta o custo, o tamanho e o peso do equipamento. Estes sensores são resistentes à vibrações, à choques e à altas temperaturas. Com a fibra óptica é possível realizar a multiplexação dos sinais de diversos sensores.

O uso das fibras ópticas na comunicação entre os instrumentos submarinos de medição e as unidades de produção diminui o tempo de recebimentos de sinais, o que permite o monitoramento em tempo real dos poços de produção e injeção. As fibras ópticas aumentam a precisão das medições realizadas em ambientes altamente agressivos e não ocorre atenuação significativa de sinal devido a distâncias elevadas.

O objetivo deste trabalho é auxiliar no desenvolvimento de sensores, destinados ao monitoramento de poços de petróleo, instrumentados com sensores ópticos com a tecnologia de redes de *Bragg*, conhecidos como FBG's (*Fiber Bragg Grating*).

Como ponto de partida optou-se pelos testes de qualificação dos adesivos pré-selecionados para a aplicação nas fibras ópticas contendo as FBG's, que teve como finalidade definir qual dos adesivos apresentou maior repetitividade e reprodutibilidade, menor histerese e melhor estabilidade nas medições realizadas. Foram realizados ensaios de tração em corpos de prova instrumentados com *Strain Gages*, para definir a tensão e a deformação máximas que poderiam ser aplicadas no material a ser utilizado na fabricação da membrana de sensor de pressão e temperatura (P&T), sem que o mesmo apresentasse deformações plásticas permanentes.

Foi definido como procedimento de colagem padrão de cada um dos adesivos as orientações de seus respectivos fabricantes, com a finalidade de assegurar o melhor desempenho dos mesmos. Ensaios cíclicos foram realizados em cinco níveis de força e quatro níveis de temperatura para determinar o desempenho de cada um dos adesivos.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica necessária para o entendimento do processo que envolvem o desenvolvimento de sensores com a tecnologia das fibras ópticas, passando pelo processo de fixação dos sensores ópticos com a tecnologia de redes de *Bragg* e o processo de determinação dos parâmetros metrológicos dos sensores ópticos. O Capítulo 3 apresenta os materiais selecionados para compor o estudo e a metodologia experimental do trabalho, os resultados experimentais são apresentados no Capítulo 4.

A simulação numérica pelo método de elementos finitos é vista no Capítulo 5, onde se observa o detalhamento das análises numéricas desenvolvidas pelo software comercial ABAQUS. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros, seguido pelo Capítulo 7 onde as referências bibliográficas são apresentadas.



## Capítulo II

### 2. Revisão bibliográfica

O estudo do desempenho de adesivos utilizados na fixação de medidores de deformação do tipo rede de *Bragg* em sensores de vazão, pressão e temperatura faz parte de um projeto em desenvolvimento no Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS). O projeto visa o desenvolvimento de sensores de vazão por diferencial de pressão (DP) e sensores de pressão e temperatura (P&T). Este estudo tem como objetivo a determinação do desempenho dos adesivos selecionados ao serem submetidos às condições de operação dos sensores em desenvolvimento.

A fim de auxiliar no estudo do desempenho dos adesivos utilizados em sensores destinados ao monitoramento de poços de petróleo, instrumentados com fibras ópticas, o conceito de sensores baseados em tecnologia de redes de *Bragg*, métodos de calibração de instrumentos de medição e métodos de fixação de medidores de deformação, dos tipos *strain gages* e FBG's, são apresentados neste capítulo.

Uma breve apresentação das unidades de medida e a concepção de instrumentos de medição são descritos no item 2.1 e no item 2.2 são apresentados os tipos de medidores de deformação. No item 2.3, apresenta o sistema de monitoramento de pressão e temperatura além de apresentar os adesivos selecionados para estudar a qualidade da instrumentação e no item 2.4 está disposto o método de estimativa dos parâmetros metrológicos dos sensores ópticos.

#### 2.1. Unidades de medida

Segundo o presidente do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) a cultura metrológica é estratégica para o desenvolvimento das organizações [4]. A mesma contribui para ganhos de produtividade, qualidade dos produtos e serviços, redução de custos, eliminação de desperdícios e relações comerciais mais justas. Atingir este objetivo não é trivial, requer ações permanentes que vêm sendo lideradas pelo Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), criado em 1875.

O BIPM, sediado nas proximidades de Paris, tem por missão assegurar a unificação mundial das medições. Assim, é encarregado de:

- estabelecer os padrões fundamentais e as escalas para a medição das principais grandezas físicas e de conservar os protótipos internacionais;

- efetuar a comparação de padrões nacionais e internacionais;
- assegurar a coordenação das técnicas de medição correspondentes;
- efetuar e coordenar as medições das constantes físicas fundamentais relevantes para estas atividades.

A fim de quantificar uma grandeza física com maior precisão, o sistema internacional de unidades de medida (SI) estabeleceu os conceitos fundamentais das unidades de medida, conceitos estes que vem sendo atualizados ao longo do tempo. As definições das unidades de medida estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Unidades base de medida segundo o SI [4].

<b>Grandeza física de base (símbolo)</b>	<b>Unidade de base (símbolo)</b>	<b>Definição da unidade</b>
Comprimento (l)	Metro (m)	O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1/299.792.458$ s.
Massa (m)	Quilograma (kg)	O quilograma é definido estabelecendo-se a constante de Planck (h) exatamente em $6,626.070.15 \times 10^{-34}$ J·s ( $J = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )
Tempo (t)	Segundo (s)	O segundo é a duração de 9.192.631.770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.
Intensidade de corrente elétrica (I)	Ampere (A)	O fluxo de $1/1,602.176.634 \times 10^{-19}$ vezes a carga do elétron por segundo
Temperatura (T)	Kelvin (K)	O valor numérico fixo da constante de Boltzmann (k) em $1,380.649 \times 10^{-23}$ J·K <sup>-1</sup> , ( $J = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )
Quantidade de matéria (n)	Mole (mol)	A quantidade de substância de exatamente $6,022.140.76 \times 10^{23}$ entidades elementares. Este número é o valor numérico fixo da constante de Avogadro quando expressa na unidade mol <sup>-1</sup> e é chamado de número de Avogadro.
Intensidade luminosa (I <sub>v</sub> )	Candela (cd)	A candela é a intensidade luminosa, numa dada direção, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência $540 \times 10^{12}$ hertz e que tem uma intensidade radiante nessa direção de 1/683 watt por esferorradiano.

As unidades de medição expressas na Tabela 1 são chamadas de unidades de base do SI. São descritas no SI as unidades derivadas, que são formadas pelo produto de duas ou mais unidades de base. Um exemplo de unidade derivada é o Pascal,

expressa no SI pela unidade Pa, em homenagem a *Blaise Pascal*, um matemático, físico e filósofo francês. Um Pascal é equivalente a  $1 \text{ kg/m.s}^2$ .

### **2.1.1. Instrumentos de medição**

Seria inviável realizar quantificação das grandezas físicas sem o desenvolvimento de novas tecnologias. São utilizados instrumentos de medição para quantificar a grandeza a qual se deseja mensurar. A confiabilidade das medições realizadas por instrumentos de medição é garantida através do referenciamento destes as unidades base segundo o SI.

Com a definição do metro padrão, deixando de ser o protótipo localizado no BIPM e, passando a ser a definição apresentada na Tabela 1, cada país pode gerar seu padrão primário de medição do metro, elevando a precisão nas medições realizadas. O mesmo acontece com quase todas as grandezas de medição. Em 2019, entrou em vigor a nova definição do peso padrão, descrito na Tabela 1, desvinculando a grandeza de medição de massa do padrão localizado no BIPM, que desde sua criação perdeu cerca de 50 microgramas.

Exemplos de instrumentos de medição de outras grandezas são os termômetros que mensuram a temperatura, as balanças que mensuram a massa e os cronômetros que mensuram o tempo.

No desenvolvimento deste trabalho serão utilizados elementos sensores capazes de quantificar as variações de temperatura e as variações de tensão aplicadas em materiais metálicos.

## **2.2. Medidores de deformação**

São utilizados elementos sensores para quantificar a deformação sofrida por um material através da ação de uma grandeza física, como a temperatura e a tensão (força pela unidade de área). Neste trabalho foram utilizados medidores de deformação do tipo *Strain Gages* e redes de *Bragg*.

### **2.2.1. Strain Gages [5]**

O *strain gage*, inventado por *Edward E. Simmons* e *Arthur C. Rugeem* em 1938, é o nome atribuído a um sensor utilizado para mensurar deformações mecânicas dos materiais que podem ser ocasionadas pela tração, compressão, cisalhamento ou flexão do material ao qual está fixado.

Quando o material é deformado a resistência elétrica é alterada. Essa variação de resistência, geralmente mensurada com a utilização da ponte de *Wheatstone*, está relacionada a deformação através do fator de deformação indicado pelo fabricante do *strain gage*.

Um *strain gage* universal é formado por uma estrutura tal que um elemento sensor fino em forma de grade de folha metálica resistiva, com aproximadamente 5  $\mu\text{m}$  de espessura, é colocado sobre uma base de filme plástico de 15  $\mu\text{m}$  de espessura e é revestida por uma fina camada de filme laminado, como mostra a Figura 2.

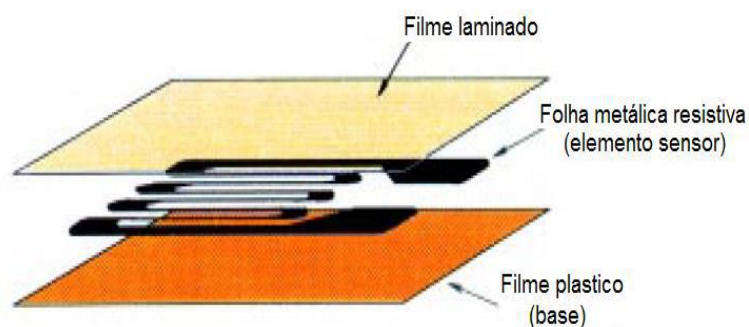


Figura 2: Composição de um *strain gage*.

O medidor de deformação deve ser fortemente ligado ao objeto de medição de modo que o elemento sensor (folha metálica resistiva) possa alongar ou contrair de acordo com a tensão suportada pelo objeto de medição. Com o alongamento ou a compressão mecânica, a maioria dos metais é submetida a uma mudança na resistência elétrica. Geralmente o elemento sensor do *strain gage* é feito de uma folha de liga de cobre-níquel que tem uma variação na taxa de resistividade proporcional à tensão.

O fator de calibração  $K$  varia de acordo com os materiais metálicos. A liga de cobre-níquel fornece um fator de calibração em torno de 2,00. Assim, um *strain gage* com esta liga permite a conversão de tensão mecânica para uma correspondente a variação da resistência elétrica.

É extremamente difícil medir com precisão a variação de resistência do *strain gage*, o que não pode ser medido com um ohmímetro convencional. Assim, alterações na resistência são medidas utilizando um circuito elétrico chamado de ponte de *Wheatstone* (Figura 3), que é um circuito elétrico adequado para a detecção de alterações na resistência com grande sensibilidade.

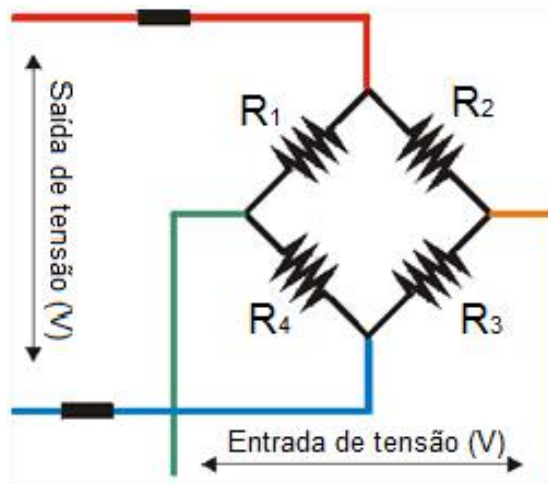


Figura 3: Ponte de *Wheatstone*.

Supondo que:

$$R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4$$

Independente da intensidade da tensão elétrica aplicada na entrada, quando as condições da equação são satisfeitas, a saída de tensão será sempre zero. Tal condição qualifica a ponte como ponte em equilíbrio. Quando a ponte perde o equilíbrio, é porque ocorreu uma variação na tensão correspondente à uma variação na resistência.

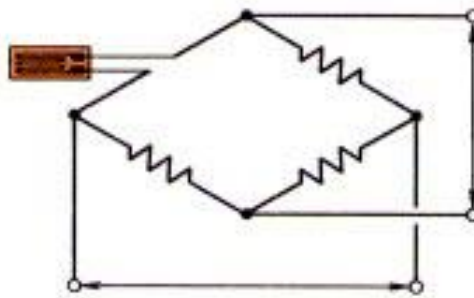


Figura 4: Um quarto de ponte.

Como mostrado na Figura 4, quando um *strain gage* é conectado na ponte de *Wheatstone* alimentada por uma tensão conhecida e ocorre variação no valor da resistência do *strain gage* ( $\Delta R$ ), a ponte gera uma tensão correspondente, representada pelo modelo matemático aproximado descrito no manual de instrução geral dos medidores de deformação [6].

$$e = \frac{1}{4} \times \frac{\Delta R}{R} \times E$$

onde,

$\Delta R$  é a variação de resistência do medidor de deformação;

$R$  é a resistência padrão definida pelo fabricante;

$E$  é a alimentação do sistema.

O equipamento utilizado para realizar o monitoramento e a aquisição de dados dos ensaios de tração é dotado de condicionamento de sinal interno, sendo assim, os *strain gages* foram conectados diretamente ao sistema de aquisição de dados. Foram utilizados *strain gages* biaxiais com o objetivo de determinar as deformações axiais e transversais dos corpos de prova.

### **2.2.2. Fibra óptica**

A fibra óptica é fabricada através do processo de extrusão do vidro ou plástico. O mesmo possui diâmetro de alguns micrometros, assumindo a forma de um filamento flexível e transparente e que é utilizado como condutor de luz com rendimento elevado, de imagens ou até mesmo de impulsos codificados. A fibra óptica possui uma grande importância em sistemas de comunicação de dados por não sofrer interferências eletromagnéticas.

Os sensores à fibra óptica vêm sendo estudados em várias áreas de atuação, devido às suas vantagens em relação aos sensores elétricos como aos *strain gages*. Destacam-se como vantagens serem mais leves em relação aos fios utilizados na instrumentação convencional, possuírem imunidade contra interferência eletromagnética e a capacidade de multiplexação de sinais na mesma fibra óptica.

Devido ao fato da fibra ser sensível tanto à deformação quanto à temperatura, a mesma pode ser utilizada no desenvolvimento de instrumentos de medição destas duas grandezas. As fibras ópticas são instrumentadas através da modulação do índice de refração da mesma, o que constitui a rede de *Bragg*.

#### **2.2.2.1. Rede de Bragg**

A rede de *Bragg* funciona como um filtro que seleciona um comprimento de uma onda de um espectro de medição. O princípio fundamental de uma FBG (*Fiber Bragg Grating*) é a reflexão de *Fresnel*, onde a luz que viaja entre meios de diferentes índices de refração pode refletir e refratar na interface. O índice de refração varia ao longo de um comprimento definido. O comprimento de onda refletido ( $\lambda_B$ ), chamado comprimento de onda de *Bragg*, é definido como [7]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

onde,

$n_{eff}$  é o índice de refração efetivo da rede no núcleo da fibra;

$\Lambda$  é o período da rede.

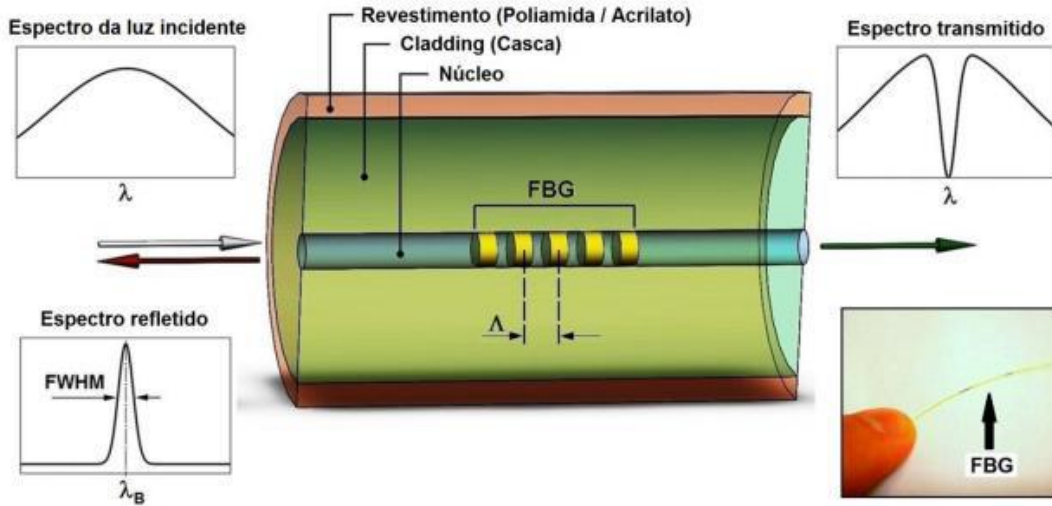


Figura 5: Representação esquemática de uma fibra óptica com uma FBG gravada em seu núcleo.

A Figura 5 mostra uma fibra óptica em corte, e em seu núcleo foi representado uma FBG, a casca e o revestimento. São também mostrados espectros típicos de reflexão e transmissão de uma FBG a partir de um dado espectro de luz incidente. No detalhe, uma FBG comercial geralmente fica entre duas marcações indicadas na fibra óptica.

O índice de refração efetivo quantifica a velocidade de propagação da luz em comparação com a sua velocidade no vácuo e depende não somente do comprimento de onda, mas também do modo em que a luz se propaga. Por esta razão, é também chamado de índice modal. O espaçamento de comprimento de onda entre os primeiros mínimos (nulos), ou a largura de banda ( $\Delta\lambda$ ), é definido como:

$$\Delta\lambda = \left[ \frac{2\delta n_0 \eta}{\pi} \right] \lambda_B$$

onde,

$\delta n_0$  é a variação no índice de refração ( $n_3 - n_2$ );

$\eta$  é a fração de poder no núcleo.

Além da rede de *Bragg* ser sensível à deformação, o comprimento de onda também é sensível à variação de temperatura, indicando que um sistema de compensação de temperatura deve ser idealizado para a mensuração correta da deformação. As FBGs podem ser utilizadas como elementos de medição do sensor P&T, sendo utilizada uma rede para mensurar a temperatura a qual o sensor se encontra e uma rede utilizada para quantificar a deformação mecânica da membrana do sensor que se deformará devido à variação de pressão da coluna de produção.

A compensação das deformações das redes devido a variação de temperatura, permite que os resultados apresentados pela deformação mecânica da membrana sejam correlacionados diretamente com o nível de pressão aplicado no elemento sensor. Ao instrumentar o sensor P&T com duas redes de *Bragg*, é possível determinar a temperatura do elemento sensor em contato com o fluido de produção e a pressão à qual a membrana foi submetida.

Em um sensor FBG o mensurando causa uma mudança no comprimento de onda,  $\Delta\lambda_B$ . A variação no comprimento de onda,  $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ , devido à uma deformação aplicada ( $\varepsilon$ ) e à uma mudança de temperatura ( $\Delta T$ ) é dada aproximadamente por [7]:

$$\left[ \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \right] = (1 - p_e)\varepsilon + (\eta + \alpha_{FBG})\Delta T$$

ou,

$$\left[ \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \right] = (1 - p_e)(\varepsilon_{FBG_1} + \varepsilon_{FBG_2}) + (\eta + \alpha_{FBG})\Delta T$$

onde,

$p_e$  é o coeficiente de tensão óptica;

$\varepsilon_{FBG_1}$  é a deformação sofrida devido a pressão aplicada à membrana do sensor;

$\varepsilon_{FBG_2}$  é a deformação sofrida devido à expansão térmica do material onde a FBG está fixada;

$\eta$  é o coeficiente de expansão térmica,  $8,6 \times 10^{-6}/K$ ;

$\alpha_{FBG}$  é o coeficiente termo-óptico,  $0,55 \times 10^{-6}/K$ ;

$\Delta T$  é a variação de temperatura do material, em K.

As redes de *Bragg* estão sendo amplamente aplicadas na instrumentação de sensores de pressão para ambientes extremamente severos, como sensores em poços de petróleo e gás para medição de efeitos de pressão externa, temperatura e vibrações sísmicas.

### 2.3. Sistema de monitoramento de pressão e temperatura



O projeto de desenvolvimento de sensores de fibra óptica do LTS tem como objetivo o desenvolvimento de dois tipos de medidores: o primeiro é o sensor P&T, responsável por estimar a pressão e a temperatura do fluido produzido ainda na coluna de produção e o segundo é o sensor DP, que será responsável por quantificar a vazão do fluido produzido. Os sensores P&T e DP são montados em um dispositivo projetado para realizar a interface entre os sensores e o fluido da coluna de produção.

Foi abordado no desenvolvimento deste trabalho:

- O comportamento das redes de *Bragg*, utilizadas para mensurar de maneira indireta a pressão e a temperatura do fluido na coluna de produção;
- O comportamento de diferentes adesivos, para verificar o desempenho dos mesmos quando submetidos a deformações e temperaturas pré-definidas;
- O instrumento de monitoramento de sinal das redes de *Bragg*, cedido pelo Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF);
- Sistema de controle e monitoramento das deformações e temperaturas aplicadas, composto por uma máquina de ensaios mecânicos e um banho térmico.

### **2.3.1. Sensor P&T**

Para o desenvolvimento do sensor P&T (Figura 6) foi utilizado o programa de elementos finitos ABAQUS com a finalidade de estimar as dimensões ideais da sua membrana. Sua geometria foi determinada levando em consideração a pressão máxima a qual o sensor será submetido. Após a análise numérica, foi definido o local onde a primeira rede de *Bragg* deve ser posicionada na membrana para que a deformação mensurada seja máxima. A segunda rede de *Bragg*, posicionada onde a deformação devido à pressão é mínima, foi utilizada para realizar a compensação e a mensuração da temperatura do fluido que passa pelo sensor P&T.



Figura 6: Foto do primeiro modelo do sensor P&T.

### 2.3.1.1. Adesivos

Segundo o artigo “*Adhesive bonding of aircraft structures*” [10], publicado no “*International Journal of Adhesion & Adhesives*” em 2000 e suas respectivas fichas de dados, os adesivos apresentados na Tabela 2 podem ser utilizados para fixar medidores de deformação e operar a temperaturas elevadas sem que o desempenho dos adesivos seja comprometido.

Tabela 2: Especificações técnicas dos adesivos.

Fabricante	Modelo	T <sub>cura</sub> (°C)	P <sub>aplicada</sub> (kPa)	T <sub>trabalho</sub> (°C)	Base
3M	AF 163-2 [33]	115 – 125	200 - 276	-55 / +121	Epoxi**
Cytec	FM 73 [34]	115 - 125	240 - 310	82	Epoxi**
LOCTITE	EA 9394 AERO [35]	25 – 93	138	-55 / + 204	Epoxi
OMEGA	TT300 [36]	100 – 150	103 - 345	200	Epoxi
Hexcel	Redux 308 [37]	180	345	121	Epoxi
Hexcel	Redux 308 <sup>a</sup> [38]	170 - 180	310 - 380	120	Epoxi
3M	AF 31 [39]	170 - 180	310 - 620	-55 / + 260	Fenol*
Hexcel	Redux Film 775 [40]	145 - 156	480 - 760	70	Fenol*
3M	AF 3109-24	180	345	-55 / +149	Epoxi

\* P<sub>aplicada</sub> na colagem é alta devido à formação de vapor d'água no processo de cura do adesivo.

\*\* Requer a aplicação do aderente Cytec BR 127 para melhor aplicação do adesivo.

Tais especificações técnicas apresentadas são provenientes dos manuais técnicos fornecidos pelos fabricantes dos mesmos. Após entrar em contato com os representantes dos adesivos listados na Tabela 2, foi constatado que alguns adesivos não eram ou não poderiam ser comercializados no Brasil. Através de novas pesquisas, outros adesivos foram selecionados. Os resultados apresentados nas referências [45] e [46], para os adesivos ND353 da EPO-TEK® e E120P da Loctite fizeram com que os mesmos fossem cogitados para integrar este estudo, porém foi encontrada a mesma dificuldade de realizar a aquisição dos adesivos apresentados na Tabela 2.

Por isso uma nova lista de adesivos foi definida e posteriormente adquirida para ser utilizada no desenvolvimento desta dissertação. Os adesivos selecionados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Especificações técnicas dos adesivos utilizados.

Fabricante	Modelo	T <sub>cura</sub> (°C)	P <sub>aplicada</sub> (kPa)	T <sub>trabalho</sub> (°C)	Base
Loctite	401 [41]	22	-	80	Etil cianoacrilato
Loctite	4090 [42]	22	-	150	Cianoacrilato/Epoxi
HBM	P250 [43]	180 (+6h)	100 a 500	250	<i>Phenolic</i>
Vishay	M-Bond 610 [44]	205 a 232	207 a 275	232	<i>Epoxy-Phenolic</i>

## 2.4. Erros e incertezas

Toda medição possui um erro, seja ele mensurável ou não. Este erro deve ser estimado e corrigido para assegurar que seus resultados possuam confiabilidade metrológica. Erro absoluto ou erro de medição é o resultado de uma medição menos o valor verdadeiro do mensurando [14].

$$e = x_i - VVC$$

onde,

$e$  é o erro de medição;

$x_i$  é o resultado de uma medição;

$VVC$  é o valor verdadeiro convencional.

### 2.4.1. Tipos de erros

#### a) Erro relativo

Dependendo da faixa de trabalho de um instrumento, o erro estimado pode ser muito grande ou muito pequeno. A forma correta de caracterizar a qualidade de uma medição é dividir o erro de medição pelo valor verdadeiro do mensurando. Esta grandeza é expressa em porcentagem.

$$e_r = \frac{e}{VVC} \times 100\%$$

onde,

$e_r$  é o erro relativo.

#### b) Erro Grosseiro

A medição com um erro grosseiro é aquela que difere muito de todas as outras do conjunto de medições. Muitas medições requerem julgamentos pessoais. Exemplos incluem a estimativa da posição do ponteiro entre duas divisões da escala ou o nível de um líquido em uma coluna líquida. A vantagem dos instrumentos digitais sobre os analógicos é que sua leitura independe de julgamentos. A maioria dos erros grosseiros é pessoal e é causada pela falta de atenção, preguiça ou incompetência. Os erros grosseiros normalmente se referem a uma única medição, que deve ser desprezada, quando identificada. Ele é imprevisível e não adianta ser tratado estatisticamente.

#### c) Erro Sistemático

É também chamado de erro determinável ou previsível. As características do erro sistemático são as seguintes:

- se mantém constante, em valor absoluto e sinal quando se fazem várias medições do mesmo valor de uma variável, sob as mesmas condições;
- varia de acordo com uma lei definida quando as condições variam;
- é devido aos efeitos quantificáveis que afetam todas as medições;
- é devido a uma causa constante;
- é mensurável;
- pode ser eliminado pela calibração.

#### d) Erro Aleatório

Segundo o VIM [5], erro aleatório é o componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. Os erros aleatórios afetam a precisão das medições. As principais causas dos erros aleatórios são:

- variabilidade natural da constante;
- erros intrínsecos ao instrumento dependentes da qualidade dos circuitos e mecanismos;
- erros irregulares devidos à histerese, banda morta, atrito;
- erros intrínsecos indeterminados relacionados com o desgaste, o uso, o atrito e a resistência de contato;
- erros de influência que aparecem de uma variação rápida de uma variável.

Toda medição possui um erro. Quando são tomados todos os cuidados para eliminar os erros de operação e de calibração, restam os erros aleatórios. Os erros aleatórios não podem ser eliminados, mas estatisticamente conhecidos. O seu tratamento é feito por métodos estatísticos, fazendo-se muitas medições, verificando a distribuição e a frequência da ocorrência. A determinação do erro aleatório se baseia em valores médios, medianas, desvios padrão e distribuição normal.

#### 2.4.2. Incertezas de medição

Incerteza de medição é caracterizada no VIM [14], como parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas. O valor declarado de uma medição deve estar acompanhado de sua incerteza.

$$(\bar{x} \pm \mu)$$

onde,

$\bar{x}$  é a média dos resultados para uma medição;

$\mu$  é a incerteza final.

Uma medição possui muitas fontes de incerteza, que podem ser agrupadas em duas categorias, que são as incertezas do tipo A e as incertezas do tipo B.

a) Incerteza tipo A

É a incerteza que provem da análise estatística de uma série de medições, caracterizada por desvios padrões experimentais. Segundo o GUM [15], a melhor estimativa de uma grandeza é a média aritmética ( $\bar{x}$ ) das ( $n$ ) medições. A dispersão das medições em torno do valor médio é caracterizada pelo desvio padrão amostral ( $s$ ).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}}$$

onde,

$s$  é o desvio padrão amostral.

A melhor estimativa do desvio padrão da média é o desvio padrão experimental da média ( $s(\bar{x})$ ), que é estimado como:

$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

onde,

$s(\bar{x})$  é a incerteza tipo A ( $\mu_A$ )

b) Incerteza tipo B

Ao contrário da incerteza tipo A, as incertezas do tipo B não utilizam a análise estatística de uma série de medições. Estas incertezas provem de informações externas ao processo de medição. Algumas fontes deste tipo de incerteza são:

- Incerteza do padrão;

Incerteza proveniente do certificado de calibração do instrumento utilizado como padrão no processo de calibração do sistema. O modelo matemático que expressa o método de estimativa da incerteza tipo B, proveniente do certificado de calibração do instrumento padrão, é:

$$\mu_{pad.} = \frac{U_{pad.}}{k_p}$$

onde,

$\mu_{pad.}$  é a incerteza do padrão padronizada, aproximadamente 68,27%;

$U_{\text{pad.}}$  é a incerteza do padrão expandida para 95,45% de confiança;  
 $k_p$  é o fator de abrangência do padrão utilizado, distribuição *t-Student*.

- Incerteza da deriva do padrão

Se o padrão utilizado tiver sido calibrado diversas vezes, utiliza-se a variação dos resultados das duas últimas calibrações para estimar a incerteza da deriva do mesmo. O modelo matemático que expressa o método de estimativa da incerteza tipo B, proveniente da deriva do instrumento padrão, é:

$$\mu_{\text{deriva}} = \frac{\text{Deriva}}{\sqrt{3}}$$

onde,

$\mu_{\text{deriva}}$  é a incerteza proveniente da deriva das duas últimas calibrações.

- Incerteza da histerese

Segundo o livro “Metrologia e Incerteza de Medição” [16], histerese é caracterizada pela maior diferença entre valores de carga e descarga de um instrumento de medição, este fenômeno é típico de instrumentos que sofrem deformação relacionada ao uso. O modelo matemático que expressa o método de estimativa da incerteza tipo B, proveniente da histerese do instrumento, é:

$$\mu_{\text{histerese}} = \frac{\text{Histerese}}{\sqrt{12}}$$

onde,

$\mu_{\text{histerese}}$  é a incerteza proveniente da histerese do instrumento padrão.

- Incerteza da resolução

Para o cálculo da incerteza da resolução, utiliza-se esta variação referente à metade da resolução dividida pela raiz quadrada de três. O modelo matemático que expressa o método de estimativa da incerteza tipo B, proveniente da resolução do instrumento, é:

$$\mu_{\text{resolução}} = \frac{\text{Resolução}/2}{\sqrt{3}}$$

onde,

$\mu_{resolução}$  é a incerteza proveniente da resolução do padrão.

- Outras incertezas

Existem outras incertezas que devem ser consideradas na determinação da incerteza final do processo, porém estas dependem do método utilizado para a medição da pressão e da temperatura.

#### 2.4.2.1. Incerteza Combinada

Incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, que constituem as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas. [15]

O modelo matemático que expressa o método de estimativa da incerteza combinada, proveniente da combinação das incertezas aplicadas ao ponto, é:

$$\mu_c = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_{pad.}^2 + \mu_{deriva}^2 + \mu_{histerese}^2 + \mu_{resolução}^2 + \dots}$$

onde,

$\mu_c$  é a incerteza combinada.

#### 2.4.2.2. Grau de liberdade efetivo

O grau de liberdade efetivo é o número de graus de liberdade associados à incerteza padrão combinada. Recomenda-se a utilização da equação de *Welch-Satterthwaite* para estimar o número de graus de liberdade efetivo. O modelo matemático que expressa o método de estimativa segundo *Welch-Satterthwaite* é:

$$\frac{\mu_c^4}{\gamma_{eff}} = \frac{\mu_A^4}{(n-1)} + \frac{\mu_{pad.}^4}{\gamma_{pad.}} + \frac{\mu_{deriva}^4}{\gamma_{deriva}} + \frac{\mu_{histerese}^4}{\gamma_{histerese}} + \frac{\mu_{resolução}^4}{\gamma_{resolução}} + \dots$$

onde,

$\gamma_{eff}$  é o grau de liberdade efetivo da incerteza combinada;



$\gamma_{pad.}$ ,  $\gamma_{deriva}$ ,  $\gamma_{histerese}$ ,  $\gamma_{resolução}$  são os graus de liberdade de cada fonte de incerteza.

Como os graus de liberdade da histerese e da resolução tendem ao infinito, proveniente de uma distribuição retangular, e o resultado da divisão de qualquer número por infinito tende a zero, o modelo matemático que expressa o método de estimativa do grau de liberdade efetivo do ponto simplificado, é:

$$\frac{\mu_c^4}{\gamma_{eff}} = \frac{\mu_A^4}{(n-1)} + \frac{\mu_{deriva}^4}{\gamma_{deriva}} + \frac{\mu_{pad.}^4}{\gamma_{pad.}} + \dots$$

O grau de liberdade efetivo é sempre um valor inteiro positivo, sendo assim, ao estimar o grau de liberdade efetivo, deve se “truncar” o valor encontrado. Devido a impossibilidade de se realizar medições incompletas, deve ser utilizado o valor inteiro positivo ignorando seus valores decimais.

#### **2.4.2.3. Fator de abrangência**

Ao se estimar o grau de liberdade efetivo da combinação das incertezas tipo A e tipo B, deve-se consultar a tabela da distribuição *t-student* para determinar o fator de abrangência,  $k_p$ , para uma probabilidade de 95,45% de o resultado observado estar dentro do intervalo de confiança.

#### **2.4.2.4. Incerteza expandida**

Incerteza expandida é o resultado do produto da incerteza combinada pelo fator de abrangência. O modelo matemático que expressa o método de estimativa da incerteza expandida, proveniente do instrumento, é:

$$U = \mu_c \times k_p$$

onde,

$U$  é a incerteza expandida para uma probabilidade de 95,45%.

Esse produto é feito para poder expandir a confiança do resultado obtido na estimativa da incerteza combinada. A incerteza padrão combinada possui uma probabilidade de aproximadamente 68,27%.

## Capítulo III

### 3. Materiais e métodos

Este capítulo apresenta os materiais utilizados na fabricação dos sensores e os procedimentos experimentais desenvolvidos para caracterizar o comportamento dos adesivos, dos *Strain Gages* e das redes de *Bragg* utilizados na instrumentação dos corpos de prova (CP's). Os CP's foram utilizados para realizar a caracterização das propriedades mecânicas do material e do comportamento dos adesivos e das redes de *Bragg* instrumentadas nos mesmos.

#### 3.1. Material

Foi definido que seria utilizado aço inox para a confecção do corpo do sensor P&T. O elemento sensor (membrana) é a única parte do sensor P&T que entrará em contato com o fluido a ser mensurado, por este motivo e para poder trabalhar com uma ampla faixa de deformação elástica, foi selecionada uma liga de Inconel.

As ligas de Inconel são classificadas como superligas. As superligas são ricas em pelo menos um entre os seguintes elementos: níquel, cobalto ou ferro. Eles são capazes de manter a estabilidade, tanto estrutural quanto de suas propriedades, em altas temperaturas, sob altas tensões e em ambientes severos. As superligas de base Níquel estão sendo cada vez mais utilizadas em aplicações no setor de petróleo e gás, uma vez que sua resistência à corrosão e à altas temperaturas apresenta vantagens nos ambientes de produção [17].

Os corpos de prova (CP's) para os diferentes ensaios mecânicos foram fabricados com a mesma liga de Inconel 718 a ser utilizada na fabricação do elemento sensor (Figura 7). Foram realizadas duas aquisições de corpos de prova, a primeira contendo os CP's de 1 a 6 e a segunda contendo os CP's de 7 a 12. As dimensões dos CP's estão listadas na Tabela 4.

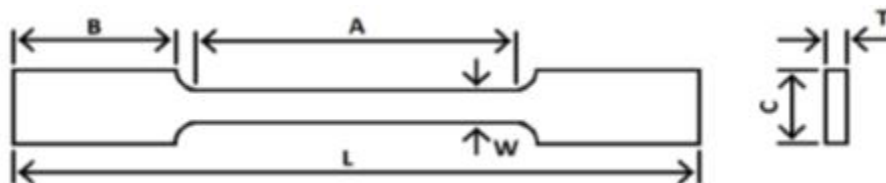


Figura 7: Dimensões de CP's de acordo com a norma ASTM E8M [18].

Tabela 4: Mapeamento dos CP's.

Amostra	W (mm)	T (mm)	L (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
CP01	12,50	1,55	200,00	86,00	50,00	20,00
CP02	12,48	1,54	200,00	86,00	50,00	20,00
CP03	12,50	1,55	200,00	86,00	50,00	20,00
CP04	12,50	1,54	200,00	86,00	50,00	20,00
CP05	12,49	1,54	200,00	86,00	50,00	20,00
CP06	12,50	1,54	200,00	86,00	50,00	20,00
CP07	12,47	1,54	200,00	86,00	50,00	20,00
CP08	12,48	1,57	200,00	86,00	50,00	20,00
CP09	12,48	1,57	200,00	86,00	50,00	20,00
CP10	12,49	1,58	200,00	86,00	50,00	20,00
CP11	12,49	1,58	200,00	86,00	50,00	20,00
CP12	12,47	1,53	200,00	86,00	50,00	20,00

**W:** Largura da seção a ser testada;

**T:** Espessura da seção a ser testada;

**L:** Comprimento total do CP;

**A:** Comprimento da seção a ser testada;

**B:** Comprimento da área onde a Instron poderá segurar no CP;

**C:** Largura da área onde a Instron poderá segurar no CP.

### 3.2. Metodologia experimental

Os ensaios mecânicos foram conduzidos em corpos de prova dimensionados segundo a norma ASTM E8M [18], apresentados na Tabela 4. Além dos dados da geometria, a caracterização do material que constitui a membrana do sensor é imprescindível para uma boa correlação numérico-experimental. As propriedades mecânicas da liga de inonel foram determinadas através do ensaio de tração realizado em 9 CP's.

Foram realizados ensaios de tração nos CP's 01, 02 e 03. Os resultados obtidos nestes ensaios apresentaram resultados incoerentes com os esperados, caracterizando os mesmos como Inconel 625, diferente do Inconel 718 solicitado. Para não atrasar o início dos ensaios cíclicos, os CP's 04, 05 e 06, de Inconel 625, foram utilizados para realizar os ensaios cíclicos com os adesivos e as redes de *Bragg*, enquanto os CP's de Inconel 718 eram aguardados para serem testados.

Após o recebimento dos novos corpos de prova, foram realizados os ensaios de tração nos CP's 07, 08 e 09. Os resultados dos mesmos foram menos satisfatórios que os primeiros, apresentando tensão de escoamento menor que os da liga de Inconel

625. Ao verificar o histórico do material com o fabricante, foi constatado que os mesmos deveriam ser tratados termicamente, com a finalidade de modificar sua microestrutura ao ponto de elevar a dureza e a tenacidade do material [11]. Foi solicitado a realização da solubilização e precipitação do Inconel 718 [12] [13]. Foram realizados novos ensaios de tração com os CP's 10, 11 e 12, que apresentaram propriedades mecânicas características da liga de Inconel 718 selecionada para compor a membrana dos sensores.

### 3.2.1. Ensaio de tração

Os ensaios de tração uniaxial das amostras foram realizados em uma máquina servo-hidráulica Instron (modelo 8800), com célula de carga com capacidade de 250 kN, os mesmos foram conduzidos em uma sala climatizada a 20°C. As medidas de deformação foram feitas através de medidores de deformação elétricos (*Strain Gages*).

Foram confeccionados 6 CP's de acordo com a norma ASTM E8M [18]. A literatura especializada apresenta os valores nominais das propriedades do material utilizado (Tabela 5), porém devido dificuldade de controle no processo de fabricação dos materiais, esses parâmetros podem variar, tornando assim necessária a realização dos ensaios de tração. Com a curva tensão versus deformação do material, tornou-se possível a realização das análises pelo método dos elementos finitos.

Tabela 5: Propriedades nominais dos materiais.

Material	E (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)
AISI 304	1,92E+05	275	630
AISI 316		285	590
Inconel 625	2,11E+05	465,3	914,8
Inconel 718	1,94E+05	1039,5	1389,9

**E:** Módulo de Young;

**$\sigma_0$ :** Tensão de escoamento;

**$\sigma_u$ :** Limite de resistência à tração.

O ensaio de tração possibilita a determinação do nível de deformação ao qual a liga de Inconel poderá trabalhar, sem que a mesma acumule deformações plásticas quando utilizada na fabricação da membrana do sensor P&T. Os CPs da Figura 8, foram instrumentados com *strain gages* biaxiais para monitorar as deformações do material quando submetidos aos ensaios de tração, de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM E8M [18].

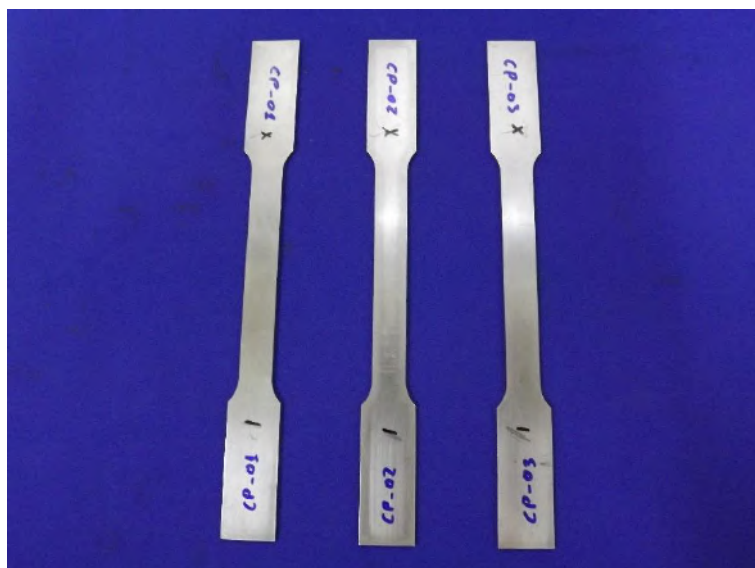


Figura 8: Corpos de prova para ensaio de tração.

As dimensões dos CPs foram listadas na Tabela 4. Foi realizada a preparação da superfície dos CPs para realizar a fixação dos medidores de deformação. Para a preparação dos CPs foram utilizadas cinco lixas com granulometria variando de 220 até 600, cada uma aplicada a angulação de 90° da anterior, lembrando de limpar a superfície do CP a cada troca de lixa e ao término do processo. Ao término deste processo, a superfície dos CPs estavam prontas para a colagem dos medidores de deformação.

Foi utilizado o adesivo Loctite 401 para realizar a fixação dos *Strain Gages*. O Strain Gage foi posicionado no centro do CP com fita adesiva, para facilitar o alinhamento. A fita adesiva foi descolada, levantando o Strain Gage, após a superfície do CP foi limpa com álcool isopropílico e foi aplicado o adesivo na parte posterior do Strain Gage.

A fita adesiva foi colada novamente no CP, tomando cuidado com o alinhamento do medidor de deformação e foi aplicada uma pressão com a mão para garantir que o excesso de adesivo fosse retirado da interface entre o Strain Gage e o CP. Após aguardar por dois minutos o adesivo curar parcialmente, o CP foi posicionado em uma superfície plana e foi colocado uma manta de borracha e um peso de um quilograma sobre o Strain Gage. O mesmo foi mantido pelo período de 24h até que o adesivo atingisse a cura total.

Após a cura do adesivo, a fita adesiva foi retirada. Foram colados, com o mesmo adesivo, os terminais para realizar a comunicação dos medidores de deformação com o sistema de aquisição de dados. Diferente dos Strain Gages, que

precisam de 24h de cura para garantir a aderência dos mesmos ao CP, os terminais foram utilizados após 2h de cura.

Realizada a instrumentação dos CPs, os testes de tração foram realizados. Os parâmetros utilizados no controle dos ensaios foram baseados na norma para ensaios em materiais metálicos, ASTM E8M [18]. A velocidade do ensaio foi de aproximadamente  $5,74 \times 10^{-7}$  m/s.

Em posse dos resultados dos ensaios de tração do Inconel, foi possível determinar o tipo de liga de Inconel que foi adquirida para realização dos testes experimentais. Mesmo solicitando uma liga de Inconel 718, que apresenta tensão de escoamento próxima a 1000 MPa, através dos ensaios de tração foi possível determinar que os corpos de prova foram fabricados com uma liga de Inconel 625.

Foram realizados novos ensaios de tração em 6 CP's comprados de outro fornecedor. Os resultados dos CP's 07, 08 e 09 apresentaram tensão de proporcionalidade e de ruptura abaixo dos apresentados nos ensaios realizados com o Inconel 625. Estes resultados são condizentes com o Inconel 718, quando fabricado e testado sem a realização de tratamentos térmicos. Esse comportamento pode ser explicado através do processo de solubilização sofrido pela liga de Inconel no processo de fabricação.

A solubilização consiste em aquecer o material a uma temperatura próxima do ponto de fusão, possibilitando a reorganização dos átomos da liga. Este processo tende a reduzir a resistência mecânica do material. Os CP's 10, 11 e 12 foram submetidos ao tratamento térmico por precipitação, realizado em temperatura mais baixa que a solubilização e por tempo prolongado. O processo de precipitação pode ser chamado de envelhecimento artificial da liga. No envelhecimento artificial é possível atingir o máximo de dureza do material.

### **3.2.2. Ensaio cíclico**

Os adesivos inicialmente indicados para o estudo foram substituídos devido a dificuldade e/ou impossibilidade de importar os mesmos para o país onde os ensaios experimentais foram realizados.

A Tabela 3 apresenta os adesivos utilizados no desenvolvimento desta dissertação. Além de adesivos resistentes a temperatura, foi utilizado também o adesivo *Loctite 401*, que possui temperatura máxima de trabalho em torno de 80°C. Segundo o fabricante do adesivo *Loctite 401*, o mesmo apresentará perda do desempenho devido a degradação térmica ao atingir temperaturas superiores à 80°C. Os resultados do

desempenho deste adesivo serviram de parâmetro para determinar o momento onde o mesmo fenômeno acontece com os outros adesivos, cujas temperaturas máximas de trabalho são superiores à 200°C.

Os CPs 4, 5 e 6, foram instrumentados com as redes de *Bragg* e utilizados nos ensaios cíclicos. O método de fixação das redes de *Bragg* nos CPs (Figura 9) e posteriormente nos sensores P&T variam de acordo com a especificação de cada fabricante de adesivo, do modelo e aplicação do mesmo. Em todos os procedimentos de colagem, as redes de *Bragg* devem estar levemente tensionadas, para que, caso as mesmas apresentem deformações no sentido da compressão seja possível a realização da medição. Os níveis de tensionamento aplicados foram descritos na Tabela 6.

Outro erro de instrumentação a ser evitado realizando este procedimento, é que a rede apresente deformação no sentido da compressão suficiente para que a mesma perca o contato com os CPs e com a membrana do sensor P&T, o que acarretaria em medições que não teriam relação com as deformações mecânicas ou térmicas aplicadas nos CPs ou na membrana do sensor P&T.

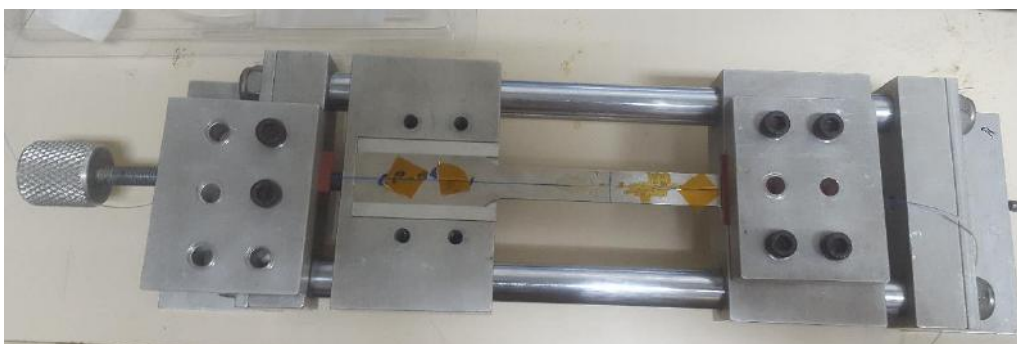


Figura 9: Rede de *Bragg* tensionada para instrumentação.

Tabela 6: Tensionamento das redes durante a instrumentação.

Identificação		FBG1 (nm)		$\varepsilon_1$ (μs)	FBG2 (nm)		$\varepsilon_2$ (μs)
Fibra	CP	Antes	Depois		Antes	Depois	
46.840.702.764	04	1528,86873	1529,08126	175,967	1541,40741	1543,83312	1992,021
46.840.702.765	06	1528,71725	1529,35650	529,321	1541,62200	1543,45392	1504,188
46.840.702.767	05	1528,85471	1529,60378	620,198	1541,41619	1542,88357	1205,022

Os valores de deformação apresentados na Tabela 6 são provenientes da aplicação do modelo matemático fornecido pelo fabricante das redes de *Bragg* apresentado abaixo:

$$\varepsilon = 10^6 x \left[ \frac{(\lambda - \lambda_0)}{(0,79x\lambda_0)} \right]$$

O processo de posicionamento das redes de *Bragg* no corpo de prova, tensionamento das mesmas e o processo de cura de cada adesivo faz parte de um processo demorado e com grandes possibilidades de apresentar problemas, como por exemplo, a não adesão da FBG aos CPs ou mesmo a ruptura da rede durante o processo. Foram utilizados quatro adesivos no desenvolvimento deste trabalho, P250, M-Bond 610, Loctite 4090 e Loctite 401.

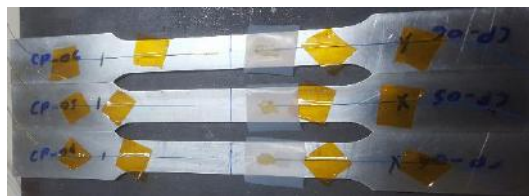
O método de fixação dos adesivos foi padronizado para atender a todos os processos. O que varia de acordo com o fabricante e modelo de cada um deles é a temperatura de cura e o tempo que a mesma deve ser submetida a este tratamento.

Após posicionar a FBG no corpo de prova e fixar a mesma com fita adesiva, o adesivo foi aplicado em uma das extremidades da zona de instrumentação da fibra. Foi utilizada uma fita de teflon para cobrir a área onde o adesivo foi depositado. Por cima desta, foi colocada uma manta de silicone e uma peça de aproximadamente 1,8 kg, garantindo que a rede de *Bragg* fosse totalmente apoiada no corpo de prova e que o adesivo fosse espalhado homogêneamente sobre a superfície. Dependendo do adesivo aplicado, foi realizado o tratamento térmico da instrumentação para garantir a cura total dos adesivos. Após retirar a peça de 1,8 kg, a manta de silicone e a fita de teflon, o corpo de prova foi posicionado no dispositivo apresentado na Figura 9 e a rede de *Bragg* foi tensionada para possibilitar a realização da instrumentação na outra extremidade da rede. Assim como apresentado nas Figuras 10 e 11.





a) Posicionamento da rede de Bragg no CP-04



c) Posicionamento das coberturas de teflon sobre o adesivo



b) Aplicação do adesivo P250 de um lado das redes



d) Posicionamento da manta de silicone sobre a cobertura de teflon



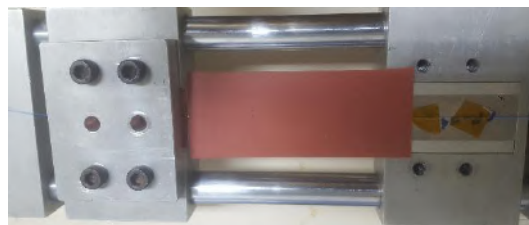
e) Aplicação da força de 1,8 kg sobre a instrumentação para garantir a adesão da P250

Figura 10: Instrumentação do lado X dos CPs com as redes de Bragg e os adesivos selecionados.

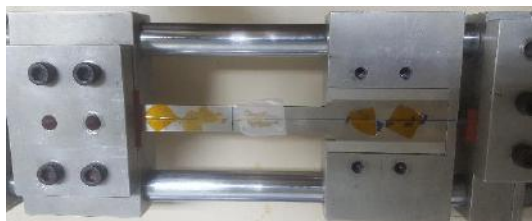
Após a realização do procedimento descrito na Figura 10, os corpos de prova foram inseridos no forno com temperatura controlada a 220°C por um período de 6h, período este informado pelo fabricante do adesivo. Após o resfriamento das amostras, o CP-04 foi fixado no aparato apresentado na Figura 9 e tensionado. O nível de tensionamento de cada corpo de prova foi descrito na Tabela 6.



a) CP-04 fixado no aparato de tensionamento



c) Posicionamento da manta de silicone sobre a instrumentação



b) Aplicação do adesivo e posicionamento do teflon na amostra



d) Posicionamento do aparato dentro do forno

Figura 11: Continuação da instrumentação dos CPs com as redes de *Bragg* e os adesivos selecionados.

Ao inserir a amostra dentro do forno com o peso de 1,8 kg sobre a instrumentação, o eixo que realiza o tensionamento da rede de *Bragg* deve ser aliviado. Nas instrumentações onde o tensionamento do aparato não foi realizado ocorreu a ruptura das redes de *Bragg* durante o processo de cura dos adesivos.

Para realizar o tensionamento das redes de *Bragg* foi necessário a utilização de um interrogador óptico. O LTS possui um interrogador óptico SmartScan, fabricado pela SmartFibres, porém o mesmo apresentou problemas de funcionamento antes mesmo de iniciar as instrumentações dos corpos de prova. A fim de dar continuidade ao desenvolvimento do trabalho, foi solicitado uma colaboração do LIF, que cedeu um interrogador óptico fabricado pela *Micron Optics*, modelo SM125 (Figura 12) para a realização dos ensaios experimentais.



Figura 12: Interrogador Óptico – Modelo: sm125 – *Micron Optics*.

Foi realizada a verificação inicial dos comprimentos de onda de cada uma das redes de *Bragg* adquiridas para o desenvolvimento deste estudo. A Tabela 7 apresenta os picos observados em cada uma das FBG's.

Tabela 7: Comprimento de onda das redes de *Bragg* antes da instrumentação.

Identificação		FBG1 (nm)	FBG2 (nm)
Fibra óptica	CP		
46.840.702.764	04	1528,86873	1541,40741
46.840.702.765	04	1528,71725	1541,62200
46.840.702.766	06	1528,61774	1541,63047
46.840.702.767	05	1528,85471	1541,41619
46.840.702.768	06	1528,90395	1541,49723

O adesivo Loctite 401 possui base de etil cianoacrilato e é, dentre os adesivos selecionados, o que apresenta menor dificuldade de manipulação e a cura mais rápida.

O adesivo Loctite 4090 possui base de cianoacrilato e resina epoxi. O tempo de cura desta pode chegar a 168h quando mantida a temperatura de 20°C. Segundo o manual do fabricante, a cura total do adesivo pode ser atingida se o mesmo for submetido à temperatura de 40°C pelo período de 24h. Foi utilizado o forno da máquina de ensaios mecânicos do LTS para realizar a cura deste adesivo.

O adesivo M-Bond 610 possui base fenólica. Segundo a *Micro Measurements*, na utilização do adesivo para instrumentar sensores, o mesmo deve ser submetido a temperaturas superiores a 177°C por pelo menos 1h. Após isso, a temperatura deve ser ajustada entre 202°C e 232°C por pelo menos 2h. O procedimento adotado foi submeter

o adesivo a temperatura de 180°C por 1h e posteriormente a temperatura foi ajustada para 210°C por um período de 2h.

O adesivo P250 possui base epóxi-fenólica. A recomendação do fabricante HBM é realizar a cura do adesivo a temperaturas superiores a 160°C pelo período mínimo de 4:30h, acrescido de mais 1h a 180°C. Se a utilização do adesivo ocorrer em temperaturas superiores a 180°C, a cura do adesivo deve ser realizada 30°C acima da temperatura de utilização. O procedimento adotado foi submeter o adesivo a temperatura de 200°C pelo período de pelo menos 6h.

O comprimento de onda das redes após a instrumentação estão listados na Tabela 6, junto ao nível de deformação residual da instrumentação. As redes 46.840.702.766 e 46.840.702.768 foram danificadas durante a instrumentação. A Tabela 8 apresenta o resumo da instrumentação de cada fibra óptica.

Tabela 8: Identificação dos corpos de prova instrumentados.

Identificação		Adesivo	
Fibra óptica	CP	FBG1	FBG2
46.840.702.764	04	P250	Loctite 401
46.840.702.765	04	M-Bond 610	P250
46.840.702.766	06	P250	-
46.840.702.767	05	Loctite 4090	P250
46.840.702.768	06	P250	-

Ao atingir os parâmetros necessários para a cura dos adesivos e monitorar os mesmos pelo período mínimo exigido pelos fabricantes, os CPs foram submetidos a carregamentos cíclicos. Os ensaios cíclicos foram programados seguindo os parâmetros descritos na Tabela 9. O objetivo desta etapa é determinar o desempenho do processo de colagem e cura das FBGs para cada adesivo aplicado nas amostras. Determinar o nível de deformação que pode ser aplicado aos CPs para a qual as FBGs apresentem resultados repetitivos, é importante no desenvolvimento do sensor para verificar se o mesmo apresentará baixa histerese e boa repetitividade / reprodutibilidade. As tensões na Tabela 9 foram estimadas em função dos dados obtidos nos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de Inconel 625, as mesmas são referentes a tensão de proporcionalidade do material testado.

Tabela 9: Programação de teste.

<b>Tensão de escoamento (%)</b>	<b>Tensão Aplicada (MPa)</b>	<b>N° de ciclos</b>
19	89	50
38	178	50
57	266	50
76	355	50
95	444	50

Os ensaios cíclicos descritos na Tabela 9 foram realizados a temperaturas controladas como descrito na Tabela 10, podendo totalizar até 1000 ciclos de carregamento com cada FBG. O objetivo desta etapa é verificar a influência da temperatura no desempenho dos adesivos e determinar qual destes apresenta melhores resultados.

Tabela 10: Temperaturas de teste.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>N° de ciclos</b>
20	250
50	250
100	250
150	250

## Capítulo IV

### 4. Resultados experimentais

Os resultados experimentais obtidos através da realização dos ensaios descritos no Capítulo 3 estão apresentados a seguir. Este capítulo está dividido em duas partes, a primeira que apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração e a segunda descreve os resultados observados durante os ensaios cíclicos.

#### 4.1. Ensaio de tração

Os gráficos representativos dos ensaios de tração e os gráficos utilizados para o levantamento das propriedades mecânicas dos materiais foram apresentados no ANEXO I.

Os ensaios de tração foram realizados em nove CP's instrumentados com medidores de deformação do tipo *strain gages* biaxiais para aço (Tabela 11). O adesivo de fixação utilizado foi a Loctite 401. O objetivo dos mesmos foi determinar a curva do material para o modelo numérico e determinar o nível de deformação que deve ser aplicado nos testes cíclicos.

Tabela 11: Especificação dos *strain gages* utilizados.

<b>Modelo</b>	KFG-5-120-D16-11
<b>Fabricante</b>	KYOWA
<b>Fator do <i>strain gage</i> (24°C, 50%RH)</b>	2,10 ± 1,0 %
<b>Comprimento do <i>strain gage</i></b>	5 mm
<b>Resistência do <i>gage</i> (24°C, 50%RH)</b>	119,8 ± 0,3 Ω
<b>Coeficiente de expansão térmica</b>	11,7 PPM/°C
<b>Coeficiente de temperatura do fator do <i>gage</i></b>	+0,008 %/°C
<b>Adesivos aplicáveis aos <i>gages</i></b>	CC-33 <sup>a</sup> , PC-6

Com o intuito de coletar os dados observados durante os testes de tração realizados na máquina de ensaios mecânicos do LTS, foi utilizado um software de aquisição de dados desenvolvido e qualificado pelo LTS dentro da plataforma LabView (SGAD-CRESPO-2016-02.vi), um conjunto de *hardwares* composto por um sistema de condicionamento de sinais da *National Instruments* (NI cDAC-9178 + NI 9235 + NI 9207) e um notebook (Figura 13).

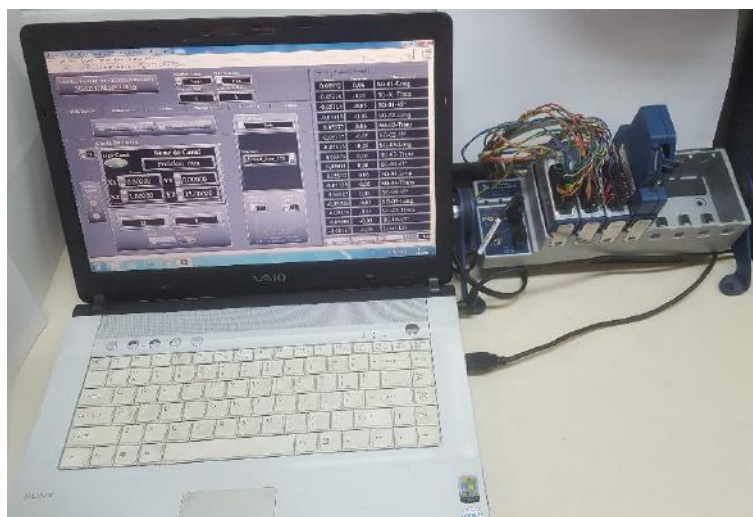


Figura 13: Sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios de tração.

O sistema de aquisição de dados utilizado nos testes de tração, possui módulos de condicionamento de sinal específicos para a medição da deformação dos *strain gages*. O condicionamento apresentado no Capítulo 2, na subdivisão 2.2.1., tem o caráter de explicar física e estatisticamente, como ocorre o condicionamento interno dos sinais obtidos através da deformação dos *strain gages*.

Os testes de tração uniaxial dos corpos de prova de Inconel foram realizados com taxa de carregamento de 0,3 mm/min em uma máquina servohidráulica INSTRON 8800 (Figura 14), dotada com célula de carga de capacidade de 250kN. Os testes foram realizados nas dependências do LTS.



Figura 14: Máquina servohidráulica INSTRON 8800.

Os ensaios foram conduzidos até o rompimento dos corpos de prova. Os dados observados e aquisitados foram: a força aplicada pela máquina, o deslocamento do atuador da mesma, as deformações longitudinais e transversais da amostra testada.

Os gráficos representativos dos ensaios de tração foram construídos com duas curvas tensão-deformação cada, uma com o deslocamento da máquina e outra com os resultados obtidos com o *strain gage*.

Os Gráficos de 1 a 9 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de tração dos corpos de prova 1, 2, 3, 10, 11, 12, 7, 8 e 9, respectivamente. Os eixos dos gráficos são compostos pela tensão verdadeira estimada como sendo a força aplicada no corpo de prova dividida pela área da seção transversal do mesmo. Observa-se que as curvas referentes as deformações dos strain gages terminam muito antes das curvas cujas deformações são provenientes do deslocamento do atuador, isso se dá pois os strain gages utilizados são fabricados para leituras inferiores a 6% de deformação.



O eixo y do gráfico é composto pela tensão verdadeira aplicada no corpo de prova ( $\sigma_{Verdadeira}$ ). O eixo x do gráfico é composto pela deformação do corpo de prova durante o ensaio ( $\varepsilon_{LVDT}$ ).

$$\sigma_{Verdadeira} = \frac{F}{A} \times \left(1 - \frac{\varepsilon_{LVDT}}{100}\right)$$

$$\varepsilon_{LVDT} = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100$$

onde,

$\sigma_{Verdadeira}$  é a tensão verdadeira exercida sobre o material;

$F$  é a força exercida pela máquina de ensaios mecânicos;

$A$  é a área da seção transversal do CP;

$\varepsilon_{LVDT}$  é a deformação do corpo de prova obtida através do deslocamento da máquina de ensaios mecânicos;

$\Delta l$  é a variação do medidor de deslocamento da máquina;

$l_0$  é a dimensão A da Tabela 4.

As propriedades mecânicas dos materiais foram determinadas utilizando os dados obtidos nos ensaios de tração. Foram utilizados os dados obtidos com os *strain gages* pois os dados obtidos através o deslocamento do atuador de força são influenciados pela elasticidade do sistema como um todo (parte do corpo de prova fora da área útil, garras, atuador, célula de carga, entre outros). O coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade do Inconel 625 e do Inconel 718, foram determinados através dos modelos apresentados nos gráficos 10, 11, 12 e 13, respectivamente. Os Gráficos 11 e 13 possuem eixos semelhantes aos dos Gráficos de 1 a 9. Os Gráficos 10 e 11 foram construídos apresentando os dados dos strain gages biaxiais instrumentados nos corpos de prova, no eixo y foi apresentada a deformação transversal do CP e no eixo x foi apresentada a deformação longitudinal do mesmo.

A tensão de escoamento, ou proporcionalidade, foi determinada com base nos dados experimentais. A mesma foi definida como a tensão do material quando a deformação do mesmo atinge 0,5%. As propriedades dos corpos de provas estão representadas na Tabela 12.

Tabela 12: Propriedades mecânicas dos CPs.

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-10	CP-11	CP-12	CP-07	CP-08	CP-09
<b>Tensão de proporcionalidade (MPa)</b>	459,36	458,13	457,52	348,98	353,98	347,58	954,00	977,06	966,86
<b>Tensão de escoamento (MPa)</b>	469,65	470,97	461,34	374,79	379,47	413,41	1164,19	1182,48	1182,42
<b>Limite de resistência à tração (MPa)</b>	916,94	914,29	913,26	789,22	768,80	762,21	1240,62	1241,91	1237,85
<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	211,81	212,26	211,77	186,45	192,15	199,07	197,19	197,17	197,21
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,315	0,314	0,312	0,296	0,283	0,271	0,405	0,407	0,403

Através dos dados observados foi possível identificar que o material utilizado na fabricação dos CP's 1, 2, 3, 4, 5 e 6 foi o Inconel 625, os CP's 7, 8, 9, 10, 11 e 12 foram fabricados com Inconel 718. Os CP's 7, 8 e 9 foram testados como recebidos e os CP's 10, 11 e 12 sofreram os processos de solubilização e precipitação para incrementar as propriedades mecânicas do Inconel 718. Realizando a média dos dados obtidos nos testes de tração dos CPs 7, 8 e 9, foi observado que o CP-08 apresentou uma curva tensão-deformação verdadeira muito próxima a curva média dos três corpos de prova. Os dados obtidos no ensaio do CP-08 foram adotados para definir a curva do material utilizada no modelo numérico utilizando o software ABAQUS.

#### 4.2. Ensaio cíclico

Os gráficos representativos dos ensaios cíclicos, os gráficos que apresentam os dados gerados pelas redes de *Bragg* durante os ensaios e os gráficos da correlação entre a tensão aplicada e a deformação lida pela FBG foram apresentados no ANEXO II.

Foram realizados ensaios cíclicos em três corpos de prova instrumentados com as FBG's listadas na Tabela 8 e com os adesivos listados na Tabela 3.

O CP-04 foi fixado a máquina de ensaios mecânicos. A temperatura do forno foi ajustada e controlada à 20 °C, após a estabilização da temperatura foi dado início ao ensaio segundo procedimento descrito na Tabela 9. Ao término do ensaio realizado a temperatura de 20 °C o controle da máquina de ensaios foi transferido para o modo "controle de carga" para garantir que a amostra não fosse tensionada ao se elevar a temperatura do forno.

A temperatura de teste foi elevada ao patamar de 50 °C, de acordo com a Tabela 10. Após a estabilização da temperatura o ensaio foi realizado seguindo novamente o procedimento descrito na Tabela 10. O procedimento foi repetido para as temperaturas de 100 °C e 150 °C.

O Gráfico 14 apresenta os resultados experimentais obtidos através da aquisição de dados do sistema de controle da máquina de ensaios mecânicos para o CP-04 seguindo o procedimento descrito nas Tabelas 9 e 10.

Os resultados experimentais obtidos com o interrogador óptico, para as redes de *Bragg* do CP-04, FBG1 e FBG2, convertidos em termos de deformação utilizando o modelo matemático fornecido pelo fabricante das redes de *Bragg*, podem ser observados nos Gráficos 15 e 16.

Foram realizados 50 ciclos para cada nível de deformação totalizando 250 ciclos para cada temperatura. Os ensaios foram conduzidos em quatro níveis de temperatura totalizando 1000 ciclos realizados em cada ensaio realizado. O eixo y apresenta os valores de deformação das redes de *Bragg* o eixo x apresenta o tempo de duração de cada ensaio. Pode ser observado uma elevação nos valores de deformação a cada temperatura testada.

No Gráfico 16 foram apresentados os dados obtidos pela FBG instrumentada com Loctite 401. Não foi possível realizar os ensaios a temperaturas superiores a 50 °C pois o adesivo apresentou problemas em garantir a aderência da FBG. Segundo o fabricante do adesivo o mesmo foi projetado para resistir a temperaturas inferiores a 70 °C, por isso este comportamento a temperatura de 100 °C ocorreu como esperado.

A correlação dos dados apresentados nos Gráficos 14, 15 e 16 são apresentados nos Gráficos 17 e 18. O eixo y apresenta a tensão aplicada em cada passo descrito na Tabela 9. O eixo x apresenta a deformação para cada nível de força aplicada. São apresentados nos Gráficos 17 e 18 os valores médios das deformações aplicadas a cada nível de tensão para as quatro temperaturas descritas na Tabela 10.

Com os dados experimentais apresentados foi possível observar que, o adesivo P250, de fabricação da HBM, resistiu as deformações e as temperaturas aplicadas. Os resultados apresentam uma correlação linear em relação aos eixos apresentados no Gráfico 17. O adesivo Loctite 401 apresentou resultados satisfatórios a temperaturas inferiores a 50 °C, ao realizar o incremento de temperatura para o nível de 100 °C a FBG2 apresentou descolamento do corpo de prova, indicando a degradação térmica do adesivo a temperaturas superiores a indicada pelo fabricante, impossibilitando a geração de dados experimentais por isso o gráfico apresenta somente os valores observados a 20 °C e 50 °C.

Durante o processo de instrumentação do CP-05 ocorreu a ruptura da fibra óptica que contia as duas redes de *Bragg* a serem monitoradas nos ensaios. Devido à necessidade de realizar uma modificação no modo de leitura das redes instrumentadas do CP-05, foram realizados dois ensaios cíclicos. O primeiro ensaio foi realizado observando a FBG1, instrumentada com o adesivo Loctite 4090 (Gráfico 19). O segundo ensaio cíclico foi realizado observando a FBG2, instrumentada com o adesivo P250 (Gráfico 20). Os eixos y dos gráficos são compostos pelas tensões exercidas no corpo de prova e os eixos x dos gráficos são compostos pelas deformações exercidas no corpo de prova.

Os resultados experimentais obtidos com o interrogador óptico, para as redes de *Bragg* do CP-05, FBG1 e FBG2, convertidos em termos de deformação podem ser observados nos Gráficos 21 e 22. Pode ser observado uma elevação nos valores de deformação a cada temperatura testada.

O incremento de deformação no Gráfico 21, devido a elevação da temperatura, foi pequeno se comparado ao Gráfico 22, pois o adesivo Loctite 4090 apresentou descolamento quando submetido a temperaturas superiores a 100 °C. A correlação dos dados apresentados nos Gráficos 19, 20, 21 e 22 são apresentados nos Gráficos 23 e 24.

Com os dados experimentais apresentados foi possível observar que, o adesivo P250, de fabricação da HBM, resistiu às deformações e às temperaturas aplicadas. O adesivo Loctite 4090 apresentou resultados satisfatórios a temperaturas inferiores a 50 °C. Ao realizar o incremento de temperatura para o nível de 100 °C, a correlação entre a força aplicada e a deformação medida com a FBG2 foi menor, demonstrando que a adesão entre o adesivo, o corpo de prova e a rede de *Bragg* diminuiu. Apesar do adesivo Loctite 4090 ser indicado para trabalhar com temperatura até 150 °C, apresentou resultados insatisfatórios para o desenvolvimento proposto neste trabalho.

O Gráfico 25 apresenta os resultados experimentais obtidos através da aquisição de dados do sistema de controle da máquina de ensaios mecânicos para o CP-04 com uma nova instrumentação. O eixo y do gráfico é composto pela tensão exercida no corpo de prova e o eixo x do gráfico é composto pela deformação exercida no corpo de prova.

Os resultados experimentais obtidos com o interrogador óptico, para as redes de *Bragg* do CP-04, FBG1 e FBG2, convertidos em termos de deformação podem ser observados nos Gráficos 26 e 27. Pode ser observada uma elevação nos valores de deformação a cada temperatura testada.

A correlação dos dados apresentados nos Gráficos 25, 26 e 27 são apresentados nos Gráficos 28 e 29. O eixo y apresenta a força média aplicada em cada

passo descrito na Tabela 9. O eixo x apresenta o deformação média para cada nível de força aplicada.

Com os dados experimentais apresentados foi possível observar que, o adesivo P250, de fabricação da HBM, resistiu as deformações e as temperaturas aplicadas. O adesivo M-Bond 610 apresentou resultados satisfatórios nas temperaturas testadas.

O desempenho dos adesivos nas temperaturas de 20 °C, 50 °C, 100 °C e 150 °C foram observados nos Gráficos 30, 31, 32 e 33, respectivamente. Com essa comparação foi possível concluir que todos apresentaram resultados satisfatórios quando testados nas temperaturas de 20 °C e 50 °C. Ao elevar a temperatura para 100 °C, o adesivo Loctite 401 apresentou descolamento, não registrando mais nenhum resultado.

O adesivo Loctite 4090 apresentou resultados inconclusivos quando testado a temperatura de 100 °C, devido a este fato, foi realizado o teste a temperatura de 150 °C para verificar o desempenho do mesmo. Os resultados obtidos a temperatura de 150 °C foram definitivos para determinar quais adesivos apresentam resultados satisfatórios.

A Tabela 13 apresenta os coeficientes de correlação de *Pearson*, entre a tensão aplicada nos CPs e a medida de deformação das FBG's mensuradas com o interrogador óptico. Segundo o guia para a expressão da incerteza de medição, o coeficiente de correlação é um medida da dependência mútua relativa de duas variáveis, igual à razão de suas covariâncias e a raiz quadrada positiva dos produtos de suas variâncias. Os coeficientes de correlação foram obtidos através do modelo matemático apresentado abaixo.

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Tabela 13: Correlação dos dados obtidos nos ensaios com os adesivos.

Temperatura (°C):	Coeficiente de correlação linear:			
	P250	M-Bond 610	Loc4090	Loc401
20	0,99995	0,99986	0,99872	0,99995
50	0,99995	0,99993	0,99999	0,99992
100	0,99969	0,99906	0,99997	-
150	0,99982	0,99959	0,83415	-
Média	0,99985	0,99961	0,95821	0,99993

Observando os dados da Tabela 13, foi possível concluir que o adesivo P250, fabricado pela HBM, apresentou melhor desempenho durante os ensaios cíclicos. O adesivo M-Bond 610, fabricado pela *Micro Measurements*, apresentou resultados

satisfatórios e pode ser sugerido como um substituto para o adesivo P250 na instrumentação do sensor P&T. Apesar de apresentar correlação média entre os dados apresentados, o Loctite 4090 apresentou perda de desempenho quando submetido a temperatura superior a 100°C. O Loctite 401 apresentou boa correlação entre os dados quando utilizado a temperaturas até 50°C.

Foi possível estimar a sensibilidade das redes de *Bragg* utilizando os dados experimentais observados nos ensaios cíclicos. As Tabelas 14 e 15 apresentam a sensibilidade das redes de *Bragg* quando submetidas a diferentes níveis de deformação e temperatura, respectivamente.

A correlação entre a tensão aplicada no corpo de prova e a deformação da rede de *Bragg* pode ser descrita como sendo linear de acordo com o coeficiente de correlação de Pearson estimado na Tabela 13, quando a tensão aplicada for inferior a tensão de proporcionalidade do material. O coeficiente de sensibilidade neste caso será obtido através da derivada da equação da reta que melhor representa os dados coletados. A Tabela 14 apresenta os coeficientes de sensibilidade das redes instrumentadas com os adesivos P250 e M-Bond 610, para cada uma das temperaturas testadas.

Tabela 14: Sensibilidade das redes de *Bragg* a tensão.

Temperatura (°C)	P250		M-Bond 610	
	με/MPa	pm/MPa	με/MPa	pm/MPa
20	4,7873	4,0140	4,7790	3,9914
50	4,8178	4,1888	4,7999	3,9870
100	5,0163	4,4704	4,9460	4,1392
150	6,0512	4,8264	4,7360	3,7655

A Tabela 15 apresenta a sensibilidade das redes de *Bragg* em relação às temperaturas aplicadas nos corpos de prova instrumentados. Tanto na Tabela 14 quanto na Tabela 15 foram apresentados somente os coeficientes de sensibilidade dos adesivos que apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios cíclicos.

Tabela 15: Sensibilidade das redes de *Bragg* a temperatura.

P250		M-Bond 610	
με/°C	pm/°C	με/°C	pm/°C
19,2937	23,9227	19,7737	23,1351

Foram realizados 50 ciclos para cada nível de carregamento e para cada temperatura, possibilitando realizar a análise estatística dos dados coletados. Foi possível determinar o erro fiducial e o desvio experimental dos níveis de deformações aplicadas nas redes de *Bragg*, para os adesivos P250 e M-Bond 610. Os resultados

obtidos com o adesivo P250 e com o adesivo M-Bond 610 foram apresentados nas Tabelas 16 e 17, respectivamente.

Tabela 16: Análise estatística dos resultados obtidos – P250

Tensão aplicada (%)	20°C (MPa)												
	FBG	Instron	Erro fiducial (%)	$\mu_A$ FBG	$\mu_A$ Aplicado	Histerese FBG	Histerese Instron	$\mu_{Histerese}$ FBG	$\mu_{Histerese}$ Instron	$\mu_C$	$\gamma_{eff}$	$k_p$	U
19	89,001	89,042	0,05	0,174	0,078	0,754	0,387	0,218	0,112	0,310	472	2,01	0,62
38	178,001	178,156	0,09	0,354	0,083	8,207	0,330	2,369	0,095	2,399	$\infty$	2,00	4,80
57	266,002	267,241	0,46	0,543	0,082	8,872	0,402	2,561	0,116	2,622	$\infty$	2,00	5,24
76	355,003	356,325	0,37	0,750	0,070	8,476	0,395	2,447	0,114	2,563	$\infty$	2,00	5,13
95	444,003	445,436	0,32	0,951	0,094	8,616	0,395	2,487	0,114	2,667	$\infty$	2,00	5,33
Tensão aplicada (%)	50°C (MPa)												
	FBG	Instron	Erro fiducial (%)	$\mu_A$ FBG	$\mu_A$ Aplicado	Histerese FBG	Histerese Instron	$\mu_{Histerese}$ FBG	$\mu_{Histerese}$ Instron	$\mu_C$	$\gamma_{eff}$	$k_p$	U
19	89,001	89,045	0,05	0,169	0,075	2,654	0,318	0,766	0,092	0,794	$\infty$	2,00	1,59
38	178,001	178,104	0,06	0,470	0,128	8,599	0,942	2,482	0,272	2,544	$\infty$	2,00	5,09
57	266,001	265,499	0,19	0,551	0,092	8,862	0,382	2,558	0,110	2,621	$\infty$	2,00	5,24
76	355,002	356,322	0,37	0,752	0,094	8,558	0,403	2,470	0,116	2,587	$\infty$	2,00	5,17
95	444,002	443,668	0,08	0,990	0,083	8,558	0,438	2,470	0,126	2,666	$\infty$	2,00	5,33
Tensão aplicada (%)	100°C (MPa)												
	FBG	Instron	Erro fiducial (%)	$\mu_A$ FBG	$\mu_A$ Aplicado	Histerese FBG	Histerese Instron	$\mu_{Histerese}$ FBG	$\mu_{Histerese}$ Instron	$\mu_C$	$\gamma_{eff}$	$k_p$	U
19	89,000	89,029	0,03	0,159	0,100	2,878	0,491	0,831	0,142	0,864	$\infty$	2,00	1,73
38	177,999	178,120	0,07	0,345	0,089	5,782	0,413	1,669	0,119	1,711	$\infty$	2,00	3,42
57	265,998	265,457	0,20	0,538	0,082	9,335	0,453	2,695	0,131	2,752	$\infty$	2,00	5,50
76	354,997	354,533	0,13	0,730	0,106	8,446	0,477	2,438	0,138	2,551	$\infty$	2,00	5,10
95	443,997	443,666	0,07	0,968	0,085	8,414	0,368	2,429	0,106	2,618	$\infty$	2,00	5,24
Tensão aplicada (%)	150°C (MPa)												
	FBG	Instron	Erro fiducial (%)	$\mu_A$ FBG	$\mu_A$ Aplicado	Histerese FBG	Histerese Instron	$\mu_{Histerese}$ FBG	$\mu_{Histerese}$ Instron	$\mu_C$	$\gamma_{eff}$	$k_p$	U
19	89,000	89,026	0,03	0,197	0,075	3,264	0,370	0,942	0,107	0,972	$\infty$	2,00	1,94
38	178,000	178,127	0,07	0,371	0,072	5,908	0,297	1,705	0,086	1,749	$\infty$	2,00	3,50
57	265,999	265,448	0,21	0,564	0,089	9,329	0,417	2,693	0,120	2,755	$\infty$	2,00	5,51
76	354,999	354,541	0,13	0,766	0,092	9,289	0,354	2,682	0,102	2,792	$\infty$	2,00	5,58
95	443,998	443,674	0,07	0,988	0,079	8,887	0,318	2,565	0,092	2,752	$\infty$	2,00	5,50

Tabela 17: Análise estatística dos resultados obtidos – M-Bond 610

Tensão aplicada (%)	20°C (MPa)												
	FBG	Instron	Erro fiducial (%)	$\mu_A$ FBG	$\mu_A$ Aplicado	Histerese FBG	Histerese Instron	$\mu_{Histerese}$ FBG	$\mu_{Histerese}$ Instron	$\mu_c$	$\gamma_{eff}$	$k_p$	U
19	89,001	89,029	0,03	0,028	0,100	0,756	0,491	0,218	0,142	0,280	$\infty$	2,00	0,56
38	178,002	178,120	0,07	0,354	0,089	6,337	0,413	1,829	0,119	1,869	$\infty$	2,00	3,74
57	266,002	265,457	0,21	0,326	0,082	8,047	0,453	2,323	0,131	2,351	$\infty$	2,00	4,70
76	355,003	354,533	0,13	0,287	0,106	9,265	0,477	2,674	0,138	2,695	$\infty$	2,00	5,39
95	444,004	443,666	0,08	0,155	0,085	9,265	0,368	2,674	0,106	2,682	$\infty$	2,00	5,36
Tensão aplicada (%)	50°C (MPa)												
	FBG	Instron	Erro fiducial (%)	$\mu_A$ FBG	$\mu_A$ Aplicado	Histerese FBG	Histerese Instron	$\mu_{Histerese}$ FBG	$\mu_{Histerese}$ Instron	$\mu_c$	$\gamma_{eff}$	$k_p$	U
19	89,0006	89,0422	0,05	0,131	0,078	3,198	0,387	0,923	0,112	0,942	$\infty$	2,00	1,88
38	178,001	178,156	0,09	0,187	0,083	6,083	0,330	1,756	0,095	1,770	$\infty$	2,00	3,54
57	266,002	267,241	0,46	0,118	0,082	3,104	0,402	0,896	0,116	0,915	$\infty$	2,00	1,83
76	355,002	356,325	0,37	0,418	0,070	8,830	0,395	2,549	0,114	2,586	$\infty$	2,00	5,17
95	444,003	445,436	0,32	0,366	0,094	8,830	0,395	2,549	0,114	2,579	$\infty$	2,00	5,15
Tensão aplicada (%)	100°C (MPa)												
	FBG	Instron	Erro fiducial (%)	$\mu_A$ FBG	$\mu_A$ Aplicado	Histerese FBG	Histerese Instron	$\mu_{Histerese}$ FBG	$\mu_{Histerese}$ Instron	$\mu_c$	$\gamma_{eff}$	$k_p$	U
19	49,0208	89,026	44,94	0,062	0,075	1,544	0,370	0,446	0,107	0,468	$\infty$	2,00	0,94
38	138,021	178,127	22,52	0,174	0,072	3,000	0,297	0,866	0,086	0,890	$\infty$	2,00	1,78
57	226,021	265,448	14,85	0,401	0,089	8,007	0,417	2,312	0,120	2,351	$\infty$	2,00	4,70
76	315,021	354,541	11,15	0,159	0,092	10,051	0,354	2,902	0,102	2,909	$\infty$	2,00	5,82
95	404,022	443,674	8,94	0,165	0,079	9,558	0,318	2,759	0,092	2,767	$\infty$	2,00	5,53
Tensão aplicada (%)	150°C (MPa)												
	FBG	Instron	Erro fiducial (%)	$\mu_A$ FBG	$\mu_A$ Aplicado	Histerese FBG	Histerese Instron	$\mu_{Histerese}$ FBG	$\mu_{Histerese}$ Instron	$\mu_c$	$\gamma_{eff}$	$k_p$	U
19	89,000	89,045	0,05	0,154	0,075	4,088	0,318	1,180	0,092	1,196	$\infty$	2,00	2,39
38	177,999	178,104	0,06	0,092	0,128	5,958	0,942	1,720	0,272	1,748	$\infty$	2,00	3,50
57	265,998	265,499	0,19	0,246	0,092	8,912	0,382	2,573	0,110	2,588	$\infty$	2,00	5,18
76	354,998	356,322	0,37	0,404	0,094	9,268	0,403	2,676	0,116	2,710	$\infty$	2,00	5,42
95	443,998	443,668	0,07	0,503	0,083	9,268	0,438	2,676	0,126	2,726	$\infty$	2,00	5,45

A Tabela 18 apresenta a comparação dos resultados obtidos com os medidores de deformação do tipo *Strain Gages* e os medidores de deformação do tipo FBG. Os modelos de *Strain Gage* e de adesivo utilizados nos ensaios de tração, podem ser utilizados a temperaturas inferiores a 50°C, por isso a comparação dos dados foi realizada utilizando os resultados obtidos nos testes a temperatura de 20°C.



Tabela 18: Análise estatística dos resultados das FBG's comparados ao *Strain Gage*.

Tensão aplicada (%)	20°C (MPa)				
	<i>Strain Gage</i>	P-250	Erro fiducial (%)	M-Bond 610	Erro fiducial (%)
19	431,906	428,287	0,84	387,128	10,37
38	859,227	849,314	1,15	798,843	7,03
57	1290,000	1278,467	0,89	1223,302	5,17
76	1730,725	1706,546	1,40	1653,664	4,45
95	2283,890	2142,122	6,21	2091,750	8,41

Os resultados apresentados na Tabela 16 e na Tabela 17, dos adesivos P250 e M-Bond 610 respectivamente, mostram que em termos de desvio dos valores observados os resultados do CP instrumentado com o adesivo P250 apresenta menor erro de indicação. Em termos de variância dos dados coletados os resultados observados com o CP instrumentado com o adesivo M-Bond 610 apresentou melhor desempenho. Em termos de variação entre os picos dos ciclos aplicados os resultados do CP instrumentado com o adesivo P250 apresenta menor histerese.

Ao verificar os resultados obtidos nos ensaios cíclicos foi possível definir que o adesivo M-Bond 610 apresentando menor dispersão dos valores observados, seu erro fiducial é elevado a temperatura de 100 °C e possui valores de histerese superiores aos níveis encontrados no adesivo P250. O CP instrumentado com o adesivo P250 apresentou maior repetitividade, menor erro fiducial e menor histerese dos dados observados.

Atendendo ao objetivo deste trabalho, que é auxiliar no desenvolvimento de sensores, destinados ao monitoramento de poços de petróleo, instrumentados com sensores ópticos com a tecnologia de redes de *Bragg*, foi realizado o estudo do desempenho dos adesivos selecionados, apresentados na Tabela 3. O adesivo P250 da HBM apresentou o melhor desempenho e deve ser utilizado na instrumentação dos sensores P&T.

## Capítulo V

### 5. Modelo numérico

Este capítulo descreve o método utilizado para a realização do dimensionamento do sensor P&T, que consiste em um sensor instrumentado com uma fibra óptica com duas redes de *Bragg* (FBGs), que se destinam a medir a pressão e a temperatura no interior de uma coluna de produção. O selo, composto por uma membrana localizada na interface entre o fluido pressurizado e a fibra óptica, é a região de maior interesse no desenvolvimento do sensor.

A rede de *Bragg* instrumentada no centro da membrana determina a deformação relacionada diretamente a aplicação de pressão. A segunda rede instrumentada deformará de acordo com a variação de temperatura à qual o sensor for submetido, além de possibilitar a compensação referente à essa variação de temperatura da primeira rede de *Bragg*, o que itorna possível a medição de deformação da membrana sem a influência da temperatura [9].

O modelo de elementos finitos utilizado para o dimensionamento do sensor foi desenvolvido no trabalho de conclusão de curso da Luiza Mercadante [19]. Neste trabalho o modelo foi simplificado, pois a parte de interesse do mesmo se limita a membrana onde as redes de *Bragg* serão instrumentadas. O objetivo é determinar a geometria ideal da membrana, de forma que se maximize a deformação da mesma, proporcionando um sensor com alta sensibilidade e exatidão, se mantendo no regime elástico. O modelo é capaz de simular numericamente as condições de operação do sensor, como a aplicação de pressão na interface da membrana e de temperatura em todo o sensor.

#### 5.1. Simulação numérica

O modelo de elementos finitos [19] foi desenvolvido com o auxílio do software comercial Abaqus. O sensor foi modelado com elementos do tipo C3D8R, contendo oito nós e vinte e quatro graus de liberdade, como descrito no manual do usuário do Abaqus (ABAQUS, 2014) [20] [32], o que representa deslocamentos lineares em cada um dos nós do elemento.

Para minimizar o tempo computacional de processamento das análises numéricas, o modelo do sensor foi simplificado, assumindo-se simetria no eixo x e no eixo z. Apenas um quarto do sensor foi utilizado para as análises numéricas.

O objetivo do estudo numérico é otimizar a geometria da membrana para que este se comporte no regime elástico e proporcione deformação significativa, quando a pressão máxima de operação do sensor for aplicada. A membrana do sensor foi definida como tendo 15 mm de diâmetro. Outras medidas importantes na definição da geometria da membrana são a espessura  $t$ , o raio de curvatura do adorno do bordo  $r$ , a altura do bordo  $v$  e a distância horizontal  $h$ , conforme mostrado na Figura 15.

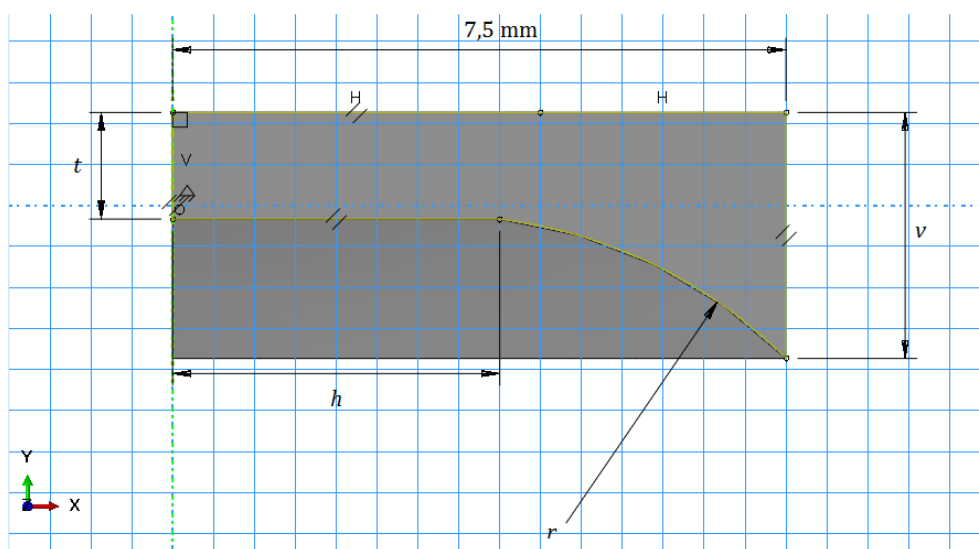


Figura 15: Desenho da membrana do sensor.

### 5.1.1. Interações, restrições e condições de contorno

A interação utilizada para definir o contato entra as partes do sensor foi do tipo *surface-to-surface*, que descreve o contato entre duas superfícies deformáveis. As interações configuradas foram entre a parte superior e o meio de inconel, a parte inferior e o meio de inconel, e as partes superior e inferior do sensor. Foi considerado contato igual a 0,1, tido como de baixa fricção, com comportamento normal/tangencial.

Restrições do tipo *tie* foram aplicadas na área de contato entre o selo e o meio do invólucro. Essa restrição une as duas regiões, acoplando cada nó de uma superfície a outra, impedindo que ocorra deslizamento entre as partes.

Como um quarto do sensor foi utilizado para as análises numéricas, para que o modelo seja representativo do sensor inteiro, foram aplicadas condições de simetria nos planos, x-y e y-z. As condições de simetria restringem o deslocamento dos nós na direção z no plano x-y, e no plano y-z, o deslocamento dos nós na direção x é restringido (Figura 16). Outra condição de contorno aplicada, restringe os movimentos de deslocamento e rotação em todos os eixos, limitando a deformação do selo apenas à ação da pressão. (Figura 17).

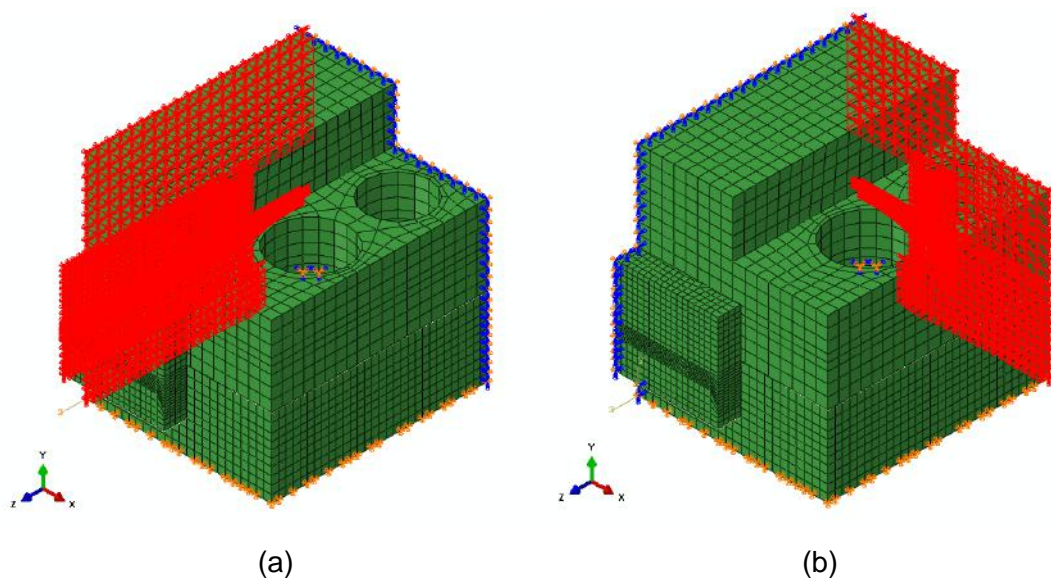


Figura 16: Condições de simetria no eixo x (a), no eixo z (b).

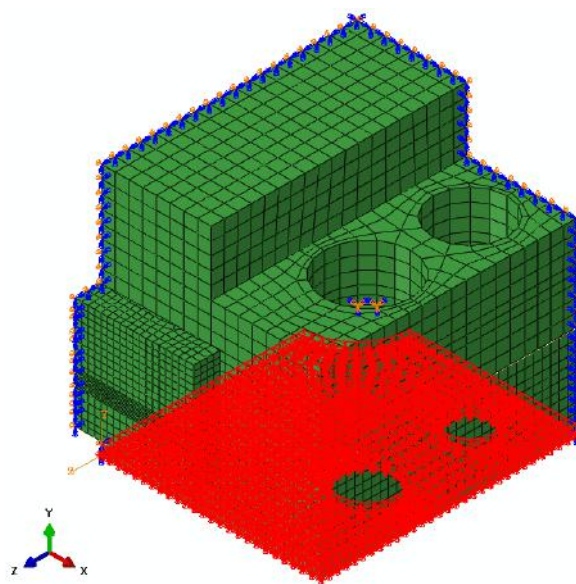


Figura 17: Condições de contorno de apoio.

### 5.1.2. Carregamento aplicado

Foram realizadas três análises distintas do modelo com o intuito de avaliar as deformações causadas somente pela ação da pressão aplicada na membrana, avaliar as deformações causadas somente pela ação da temperatura aplicada no modelo e avaliar a ação conjunta da pressão e da temperatura no sensor.

O carregamento de 5000 psi (34.473.785 Pa) de pressão uniforme foi aplicado à região do sensor onde o fluido será pressurizado, compreendendo a superfície inferior

do selo, uma área da parte inferior do sensor e do meio onde a membrana está localizada (Figura 18). O incremento de temperatura foi realizado através de um *predefined field*. A temperatura de projeto do sensor é de 150 °C.

Foi realizada inicialmente a análise das deformações da membrana pela ação da temperatura. No passo seguinte foi realizado o carregamento da pressão na área destacada na Figura 18. Na última etapa o *predefined field* foi desabilitado e foi realizado o carregamento da pressão no modelo.

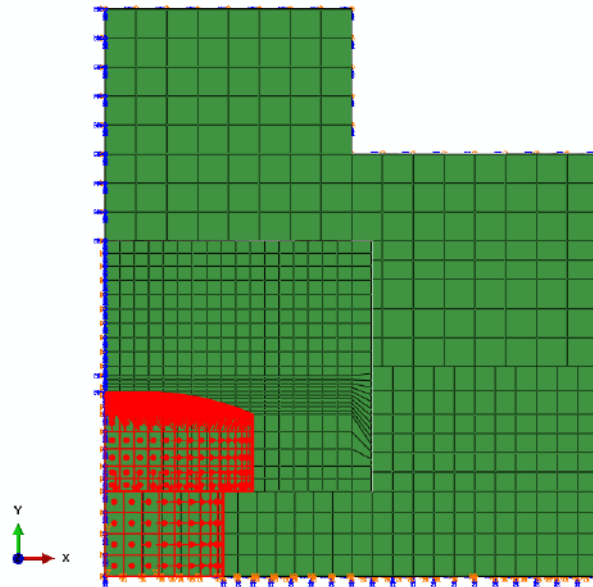


Figura 18: Carregamento de pressão no modelo numérico.

### 5.1.3. Malha de Elementos Finitos

Uma malha com predominância de elementos hexagonais foi utilizada. O refinamento da malha de elementos finitos foi definido através do tamanho dos elementos. A parte superior do sensor não exerce influência nos resultados e não necessita um alto grau de refinamento, por isso foi definido 1,50 mm de comprimento para seus elementos. Na parte inferior foi estabelecido um comprimento de 1,00 mm. No meio e no selo, devido ao tipo de restrição utilizada entre essas partes, foi necessário um maior cuidado na elaboração das malhas.

No meio foram definidos *edge seeds* locais em determinadas arestas e no restante, foram atribuídos *global seeds* com 0,75 mm de comprimento. No selo, região de interesse das análises numéricas, um grau de refinamento maior foi definido. Foram definidos *edge seeds* locais em arestas por tamanho do elemento, 0,20 mm nas arestas verticais em contato com o meio e 0,20 mm nas arestas radiais. A malha de elementos finitos pode ser observada nas Figuras 16 e 19.

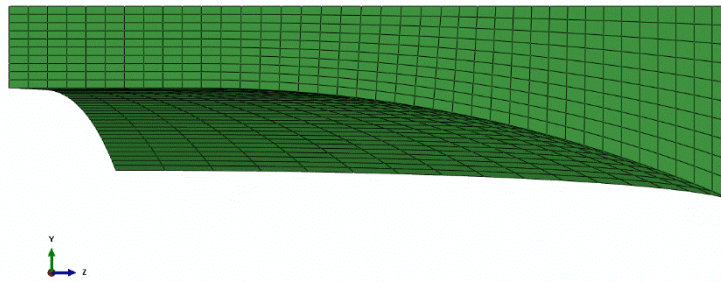


Figura 19: Malha de elementos finitos do selo do sensor óptico.

#### 5.1.4. Resultados

Foram realizadas simulações no software *Abaqus*, a fim de entender o comportamento do sensor com o selo composto pela liga Inconel 718. A geometria da membrana foi variada a fim de definir a espessura que apresentasse maior deformação, permanecendo abaixo da tensão limite de 987,52 MPa, tensão essa definida como sendo 95% da tensão de proporcionalidade do Inconel 718. Os estudos de incremento de carga e temperatura realizados durante os ensaios cíclicos, definiu que o adesivo P250, quando aplicado na amostra e testado até o limite de temperatura de 150°C e a tensão de 95% da tensão de proporcionalidade do material, apresenta resultados satisfatórios.

O ANEXO III apresenta os resultados do modelo numérico em termos de tensões equivalentes de von Mises (MPa), para os passos de temperatura, pressão e temperatura com pressão, nas Figuras 20, 21 e 22, respectivamente. Foi apresentado também o resultado para a componente de deformação logarítmica (LE33) na direção da fibra óptica nas Figuras 23, 24 e 25 para os passos de temperatura, pressão e temperatura com pressão, respectivamente. Por convenção adotam-se as deformações sob tração como positivas, representadas em vermelho, e as deformações sob compressão como negativas, representadas em azul.

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos para a geometria otimizada da membrana do sensor, definida pelo projeto ao qual este trabalho faz parte. Os resultados consistem na deformação máxima que define a variação de pressão a ser medida pelo sensor e a tensão resultante máxima.

As tensões e deformações identificadas como  $\sigma_a$  e  $\varepsilon_a$  são referentes as tensões e deformações máximas sofridas pela membrana do sensor em cada etapa de carregamento do modelo numérico. O ponto  $a$  é localizado no centro da membrana. As

tensões e deformações identificadas como  $\sigma_b$  e  $\varepsilon_b$  são referentes as tensões e deformações mínimas sofridas pela membrana do sensor em cada etapa de carregamento do modelo numérico. O ponto  $b$  é localizado a 0,50 mm da borda da membrana.

Tabela 19: Resultados das variáveis de interesse para as geometrias do selo analisadas.

	Simulação realizada – membrana com 0,8 mm de espessura		
	Temperatura	Pressão	Temperatura + Pressão
$\varepsilon_a(\mu s)$	3026,3	2694,6	5734,6
$\sigma_a(MPa)$	615,207	719,720	917,434
$\varepsilon_b(\mu s)$	1697,2	-1380,6	74,5
$\sigma_b(MPa)$	-169,338	-334,473	-482,182

A membrana do sensor constituído por Inconel 718 apresentou níveis de deformação elevados, mantendo-se dentro do regime elástico do material. Para a geometria testada, a deformação da membrana, por influência da pressão, apresentou resultados próximos à 2700  $\mu s$ .

Aplicando a temperatura e a pressão no modelo numérico os níveis de deformação da membrana do sensor atingiram patamares próximos à 5750  $\mu s$ . Destes, aproximadamente 3050  $\mu s$  devido às deformações causadas pelo acréscimo de temperatura.

Em posse dos resultados do modelo numérico, foi possível determinar o posicionamento das duas redes de *Bragg* que serão instrumentadas no sensor P&T. A FBG1, instrumentada a 7,50 mm da borda da membrana, será responsável por mensurar a pressão aplicada no sensor P&T. A FBG2, instrumentada a 0,50 mm da borda da membrana, será responsável por compensar a variação de temperatura da FBG1 e por mensurar a temperatura do fluido da coluna de produção [9] [23].

## Capítulo VI

### 6. Conclusões

A utilização de tecnologias baseadas em fibras ópticas destinadas ao monitoramento de poços de petróleo, acarreta em mudanças positivas em relação aos sensores eletrônicos. Sensores de fibra óptica são imunes à interferência eletromagnética, além de serem resistentes à vibrações e choques, resistente à altas temperaturas e possuem longa vida útil. Com a fibra óptica é possível transportar diversas informações através da multiplexação do sinal dentro do espectro de indicação do interrogador.

O uso de fibras ópticas na comunicação entre instrumentos submarinos de medição e as unidades de produção elimina problemas devido a longas distâncias e diminui o tempo de recebimentos de sinais, o que permite o monitoramento em tempo real dos poços de produção e injeção. As fibras ópticas aumentam a precisão das medições realizadas em ambientes altamente agressivos pois não ocorre perda de sinal devido ao comprimento da fibra óptica.

O objetivo deste trabalho foi auxiliar no desenvolvimento de sensores, destinados ao monitoramento de poços de petróleo, munidos com fibras ópticas instrumentadas com redes de *Bragg*, conhecidas como FBG's (*Fiber Bragg Gratings*). O sensor P&T é composto por quatro partes: inferior, meio, superior e membrana. As partes superior e inferior são constituídas por aço inox, o meio e a membrana são constituídos por uma liga de Inconel, que possui alta resistência mecânica e resistência a corrosão.

Foram testadas as ligas de Inconel 625 e Inconel 718. Três CP's fabricados com a liga de Inconel 718 sem tratamento térmico foram testadas. Três CP's de Inconel 718 foram testados após a realização dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento. A escolha do Inconel 718 solubilizado e envelhecido se deu pelo mesmo apresentar propriedades mecânicas superiores a liga de Inconel 718 sem tratamento térmico, viabilizando a construção do sensor P&T com espessura de membrana reduzida, aumentando a precisão das medições realizadas com o mesmo.

Foram realizados ensaios de tração em corpos de prova instrumentados com *Strain Gages* para definir a tensão e a deformação máximas que podem ser aplicadas ao Inconel 625, sem que o mesmo apresente deformações plásticas, além de caracterizar o material de acordo com suas propriedades mecânicas. Foram realizados ensaios de qualificação dos adesivos selecionados para a aplicação nas FBG's, que



tinham como finalidade definir qual entre os adesivos apresenta maior repetitividade, reprodutibilidade, menor histerese e melhor estabilidade nas medições realizadas.

Foi definido o procedimento de colagem de cada um dos adesivos seguindo a orientação de cada um dos fabricantes, a fim de assegurar o melhor desempenho dos mesmos. Os ensaios cíclicos foram realizados em cinco níveis de força e quatro níveis de temperatura, o que tornou possível determinar qual adesivo apresentou melhor desempenho e a sensibilidade das FBG's com relação as deformações mecânica e térmica aplicadas. O adesivo P250 fabricado pela HBM apresentou os melhores resultados quanto a repetitividade, reprodutibilidade, menor histerese e maior estabilidade das medições.

Foram realizadas simulações no software comercial ABAQUS utilizando o método de elementos finitos, a fim de determinar a geometria da membrana do sensor P&T. O modelo numérico simulou o quarto do sensor P&T sob o carregamento de pressão, simulando a atuação do fluido na coluna de produção. Em seguida, foi realizado o carregamento junto a aplicação térmica em todo o sensor, com o intuito de simular as condições de operação. A pressão de projeto foi definida como 5000 psi e a temperatura em 150 °C. Inicialmente o projeto previa que o sensor chegasse a 200 °C, essa condição não pode ser atingida nos testes experimentais devido a limitações do forno da máquina de ensaios mecânicos utilizada.

A membrana é o objeto de interesse principal do estudo, por ser a interface entre o fluido pressurizado e a fibra óptica instrumentada. A fibra óptica será instrumentada na membrana a fim de mensurar a pressão e temperatura a qual o sensor P&T serão submetidos.

Considerou-se como a configuração ideal do selo, a geometria que fornecesse maior deformação, de modo a se obter um sensor com maior sensibilidade. Através dos resultados das simulações, concluiu-se que o Inconel 625 não atende as especificações do projeto já que a faixa de deformação alcançada foi muito baixa, o que resultaria em um sensor com sensibilidade reduzida. O Inconel 718 solubilizado e envelhecido apresentou bons resultados de deformação, alcançando níveis superiores a 2500  $\mu$ s.

Os ensaios cíclicos mostraram que o mesmo não chegará a tais níveis de deformação, trabalhando em torno de 2160  $\mu$ s, condição onde o adesivo P250 apresentou resultados excelentes quando ciclados até a temperatura de 150 °C.

A espessura da membrana foi definida como sendo 0,85 mm para o sensor P&T instrumentado com redes de *Bragg*, o que confere ao sensor uma alta sensibilidade, mantendo sua eficiência e confiabilidade a pressões até 5000 psi e temperaturas até 150°C.

No entanto, para a finalização do projeto desse sensor, um protótipo deve ser fabricado e testado para que se possa definir, com confiabilidade metrológica, o desempenho do mesmo em condições de uso. Os erros de indicação, incerteza de medição e sua repetitividade e reprodutibilidade só podem ser definidos após a fabricação e instrumentação do sensor P&T.

### **6.1. Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestão de trabalhos futuros indico realizar a calibração das redes de *Bragg* a temperatura antes da colagem das mesmas na membrana do sensor P&T, com isso será possível identificar a influência da dilatação térmica do Inconel 718. Assim será possível determinar qual parte da deformação apresentada nas redes de *Bragg* devido a influência da temperatura e qual parte é devido a dilatação térmica do material que compõem a membrana.

Estudar a matriz de deslocamento para a compensação da temperatura com duas redes de *Bragg* [9].

Realizar a usinagem do sensor P&T e instrumentar as redes de *Bragg*. Realizar ensaios com o sensor P&T instrumentado para definir a qualidade dos resultados obtidos, determinar o desempenho e realizar a calibração do mesmo.

Seguindo a mesma linha de pesquisa, realizar as análises numéricas do sensor DP (diferencial de pressão) e posteriormente os testes experimentais. Realizar a calibração do sensor DP e dimensionar a restrição interna do mandril (tubo venturi), que irá gerar o diferencial de pressão durante a passagem do fluido a ser mensurado, possibilitando assim a estimativa da vazão.

É importante que se verifique a possibilidade de implementação da norma ISO/IEC 17025:2005 no Laboratório de Tecnologia Submarina, credenciando o mesmo à Rede Brasileira de Calibração (RBC), para a realização do serviço de calibração de sensores, tendo em vista a deficiência do mercado de atender a esta demanda, além de estar habilitado para executar ensaios no loop de vazão com confiabilidade metrológica.

## Capítulo VIII

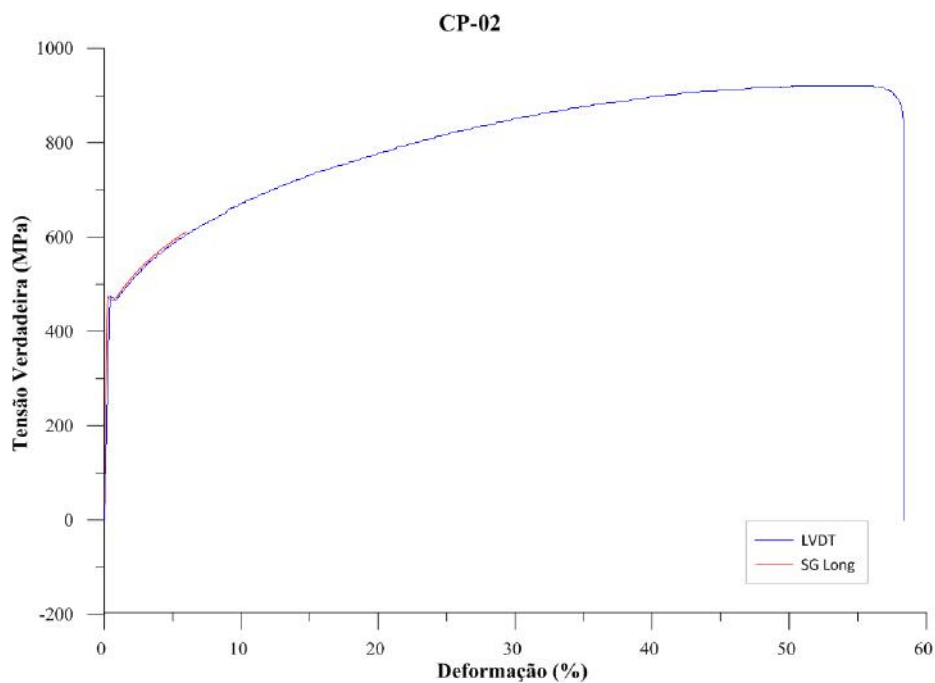
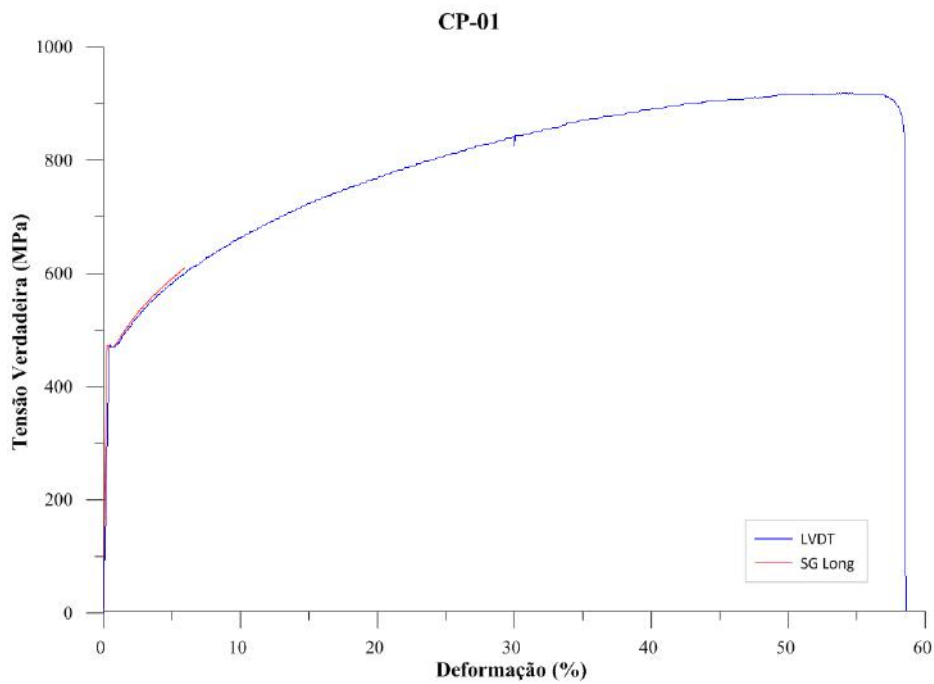
### 7. Referências Bibliográficas

- [1] Agência Nacional do Petróleo; Instituto de Nacional de Metrologia e Qualidade. Portaria Conjunta ANP/INMETRO, n.1, de 19 de junho de 2000.
- [2] OIML - *International Organization of Legal Metrology*, OIML R 117-1 - *Dynamic measuring systems for liquids other than water. Part 1: Metrological and technical requirements*, Edition 2007 (E).
- [3] UDD, E., SPILLMAN, W. B., 2011. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. 2 ed. New Jersey, John Wiley & Sons.
- [4] INMETRO. Sistema Internacional de Unidades. 1ª Edição Brasileira da 8ª Edição do BIPM. Rio de Janeiro. 2012.
- [5] ROCHA JR, R. M. “Fabricação e calibração de um transdutor de massa”. Monografia (Graduação em Tecnologia em Gestão da Produção Industrial) - IFRJ. Nilópolis – RJ. Brasil. 2010.
- [6] LINK, Walter; ARRUTI, Roberto; MELO, Wagner. Cálculo de incerteza na medição de vazão de petróleo. *Revista Metrologia e Instrumentação*. Janeiro 2011.
- [7] OTHONOS, A., KALLI, K. *Fiber Bragg Gratings. Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. 2 ed. Norwood, MA, Artech House, 1999.
- [8] KASHYAP, R. *Fiber Bragg Gratings*. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2010.
- [9] WERNECK, Marcelo M.; ALLIL, Regina C. S. B.; RIBEIRO, Bessie A.; NAZARE, Fabio V. B. A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors, Intech open access chapter. 2013.
- [10] A. Higgins, *Adhesive bonding of aircraft structures*, Int. J. Adhes. Adhes. 2000.
- [11] CALIARI, Felipe R.; CANDIOTO, Kátia C. G.; REIS, Danieli A. P.; COUTO, Antonio A.; NETO, Carlos de M.; NUNES, Carlos A. Efeito do tratamento de envelhecimento na superliga Inconel 718: aplicação em temperaturas elevadas. VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico. 2012.
- [12] MAIA, André M. P.; “Efeito dos ciclos de solubilização e envelhecimento no comportamento da liga de alumínio 6101”. Universidade do Porto / Faculdade de Engenharia. Portugal. 2012.

- [13] TRINDADE, Vicente B.; SOUZA, Edilberto da S.; PAULA, Jorge M. A.; COSTA, Maria C. M. de S.; FARIA, Geraldo L.; Efeito de Diferentes Tratamentos Térmicos Sobre Microestrutura e Microdureza de um Sistema Aço C-Mn/Revestimento de Inconel 625. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2016.
- [14] VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. INMETRO. Edição Luso-Brasileira. 2012.
- [15] GUM - Guia para a expressão da incerteza de medição. ABNT, INMETRO - Rio de Janeiro. 3ª edição. 2003.
- [16] MENDES, Alexandre; ROSÁRIO, Pedro Paulo. Metrologia e Incerteza de Medição. EPSE. 2005.
- [17] AKCA, E., GURSEL, A., 2015. "A Review on Superalloys and IN718 Nickel-Based INCONEL Superalloy", *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, v. 3, n. 1 (2015), pp. 15-27.
- [18] ASTM E8M, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]". ASTM International. 2001.
- [19] ARANTES, Luiza M. "Projeto Estrutural De Sensor De Fibra Óptica de Pressão E Temperatura Para Poços De Petróleo". UFRJ / Escola Politécnica – RJ. Brasil. 2018.
- [20] ABAQUS, 2014. Abaqus 6.14 Documentation: Analysis User's Guide. Disponível em <<http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/index.html>>
- [21] ZHAO, Yong; ZHENG, Hong-kun; LV, Ri-qing; YANG, Yang. A Practical FBG Pressure Sensor Based on Diaphragm-Cantilever. Elsevier. 2018.
- [22] IBRAR Johan M. A. et al. Analysis of FBG Sensor for Accurate Pressure Sensing With Improved Sensitivity. Elsevier. 2017.
- [23] LI, Ruiya; TAN, Yuegang; CHEN, Yiyang; HONG, Liu; ZHOU, Zude. Investigation of Sensitivity Enhancing and Temperature Compensation for Fiber Bragg Grating (FBG)-based Strain Sensor. Elsevier. 2018.
- [24] HONG, Chengyu; YUAN, Yu; YANG, Yuyao; ZHANG, Yifan; ABRO, Zamir A. A Simple FBG Pressure Sensor Fabricated Using Fused Deposition Modelling Process. Elsevier. 2018
- [25] LIU, Hong-lin; ZHU, Zheng-wei; ZHENG, Yong; LIU, Bang; XIAO, Feng. Experimental Study on an FBG Strain Sensor. Elsevier. 2017.
- [26] VORATHIN, E.; HAFIZI, Z. M.; AIZZUDDIN, A. M.; LIM, K. S. A Highly Sensitive Multiplexed FBG Pressure Transducer based on Natural Rubber Diaphragm and Ultrathin Aluminium Sheet. Elsevier. 2018.

- [27] LIANG, Min-fu; FANG, Xin-qiu; WU, Gang; XUE, Guang-zhe; LI, Hu-wei. A Fiber Bragg Grating Pressure Sensor With Temperature Compensation Based on Diaphragm-cantilever Structure. Elsevier. 2017.
- [28] WU, Rujun; ZHENG, Bailin; LIU, Zhigang; HE, Pengfei; TAN, Yuegang. Analysis on Strain Transfer of a Pasted FBG Strain Sensor. Elsevier. 2014.
- [29] MIELOSZYK M.; OSTACHOWICZ W. Moisture contamination detection in adhesive bond using embedded FBG sensors. 2016.
- [30] KARALEKAS D.; CUGNONI J.; BOTSIS J. Monitoring of hygrothermal ageing effects in an epoxy resin using FBG sensor: a methodological study. Compos. Sci. Technol. 2009.
- [31] R. D. Adams; M. M. Singh. The dynamic properties of fibre-reinforced polymers exposed to hot, wet conditions. Compos. Sci. Technol. 1996.
- [32] ABAQUS, 2004. User's and Theory Manuals, Release 6.4. Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc.
- [33] Technical Datasheet. AF 163-2 – Structural Adhesive Film. 3M. 2009.
- [34] Technical Datasheet. FM 73 – Epoxy Film Adhesive. Cytec. 2011.
- [35] Technical Datasheet. Loctite EA 9394 AERO – Epoxy Paste Adhesive. Henkel. 2013.
- [36] Technical Datasheet. TT300 – Adhesive Kit. OMEGA. 2002.
- [37] Technical Datasheet. Redux 308 – Modified Epoxy Film Adhesive. Hexcel. 2007.
- [38] Technical Datasheet. Redux 308A-NA – Modified Epoxy Film Adhesive. Hexcel. 2007.
- [39] Technical Datasheet. AF 31 – Structural Adhesive Film. 3M. 2006.
- [40] Technical Datasheet. Redux 775 – Vinyl Phenolic Structural Adhesive. Hexcel. 2007.
- [41] Technical Datasheet. Loctite 401 – Adesivo a base etil cianoacrilato. Henkel Loctite Adesivos Ltda. 2016.
- [42] Technical Datasheet. Loctite 4090 – Adesivo híbrido cianoacrilato/epoxi. Henkel Loctite Adesivos Ltda. 2016.
- [43] Technical Datasheet. P250 – Phenolic Adhesive. HBM. 2018.
- [44] Technical Datasheet. M-Bond 610 – Epoxy-Phenolic Adhesive. Vishay Precision Group. 2014.
- [45] Technical Datasheet. EPO-TEK® 353ND. 2017
- [46] Technical Datasheet. Loctite E120P – Epoxy Adhesive. Henkel Loctite Adesivos LTDA. 2014

**ANEXO I – Ensaios de tração**



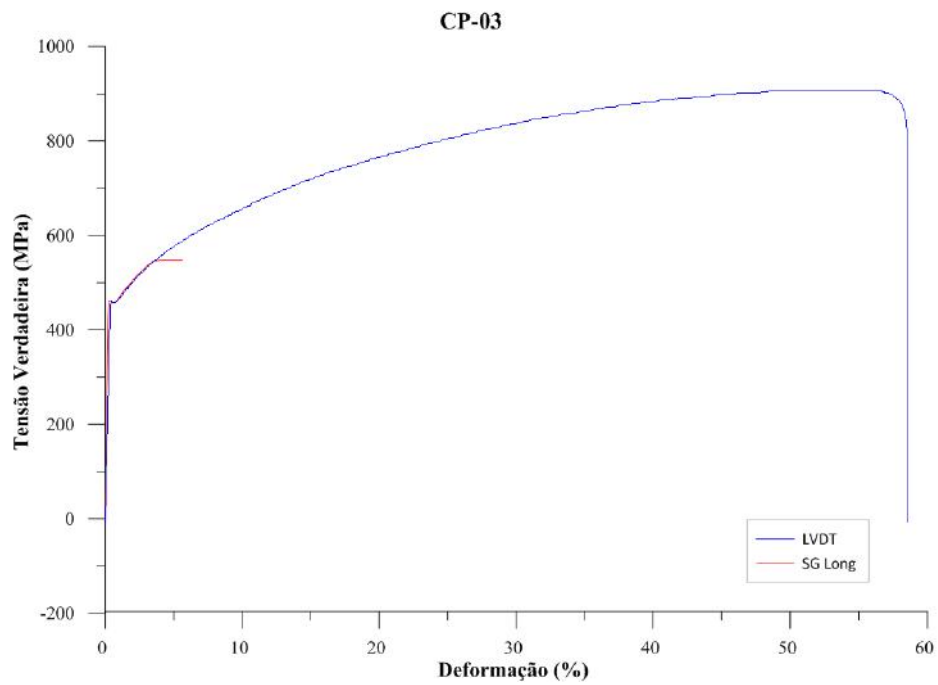


Gráfico 3: Curva tensão-deformação do CP-03.

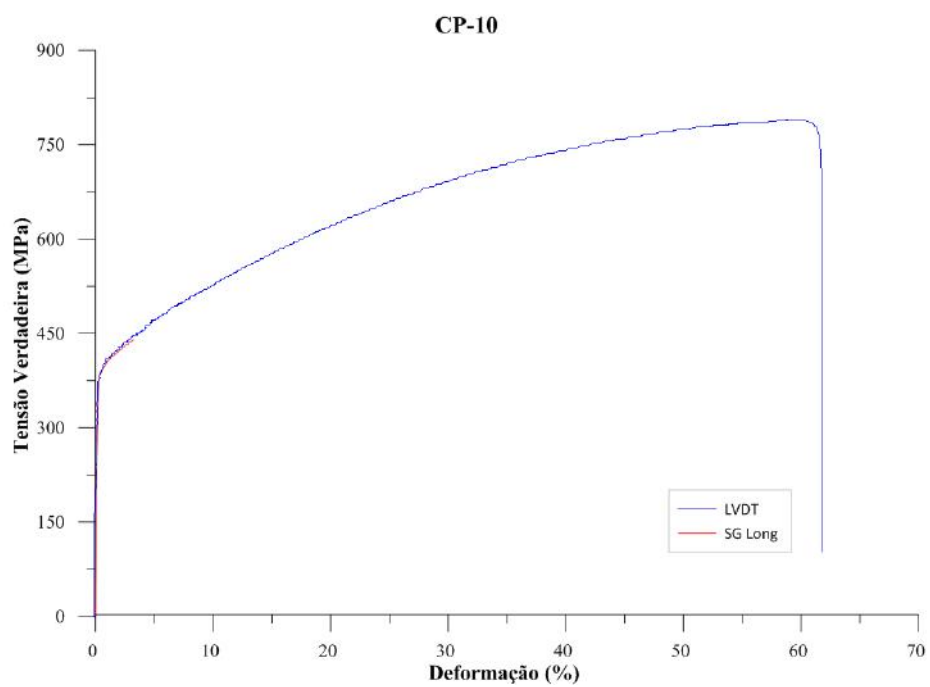


Gráfico 4: Curva tensão-deformação do CP-10.

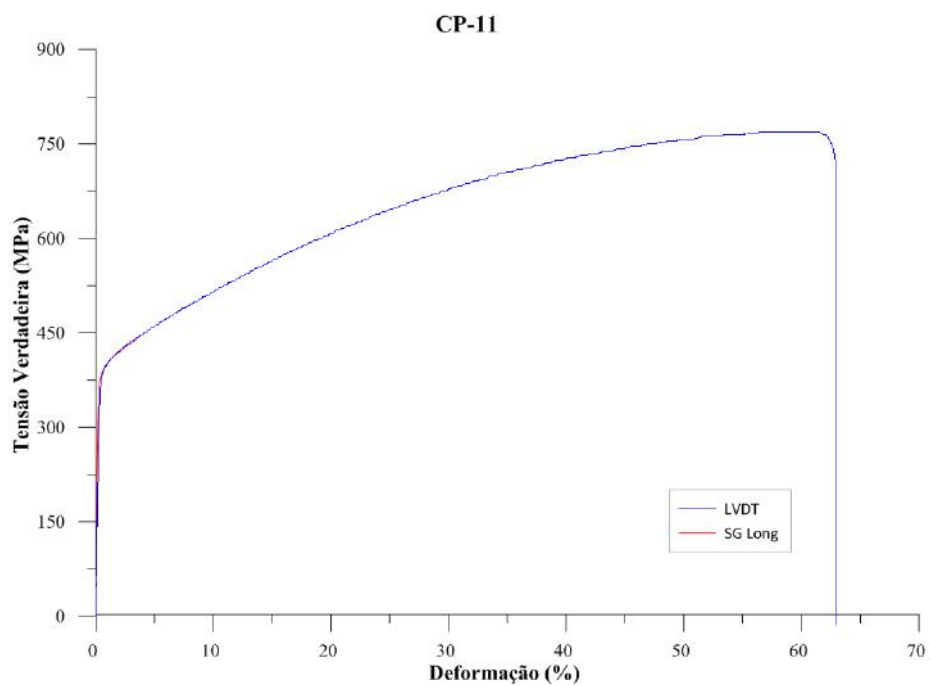


Gráfico 5: Curva tensão-deformação do CP-11.

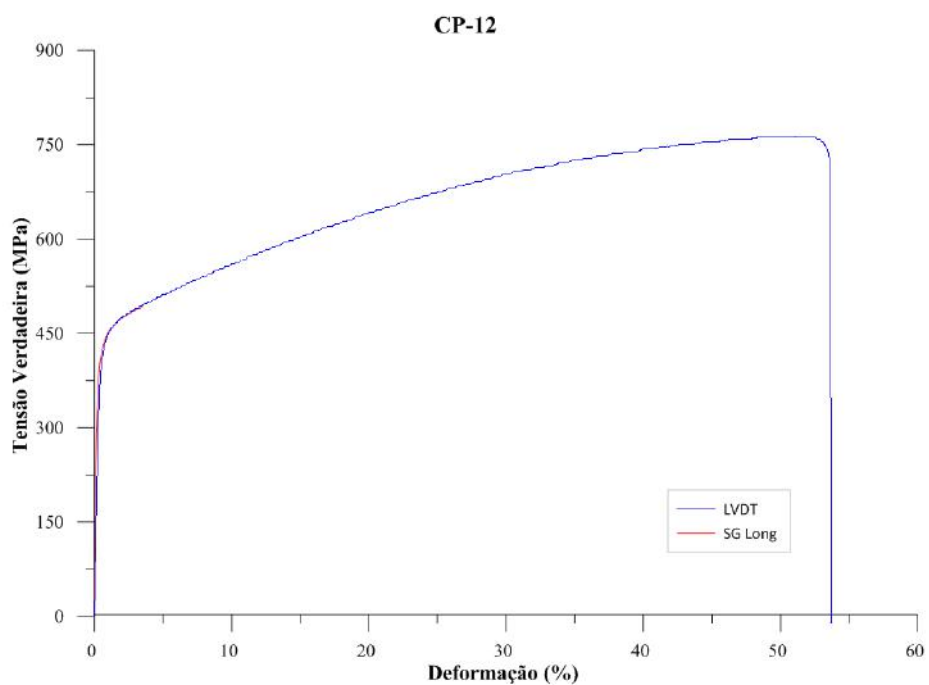


Gráfico 6: Curva tensão-deformação do CP-12.



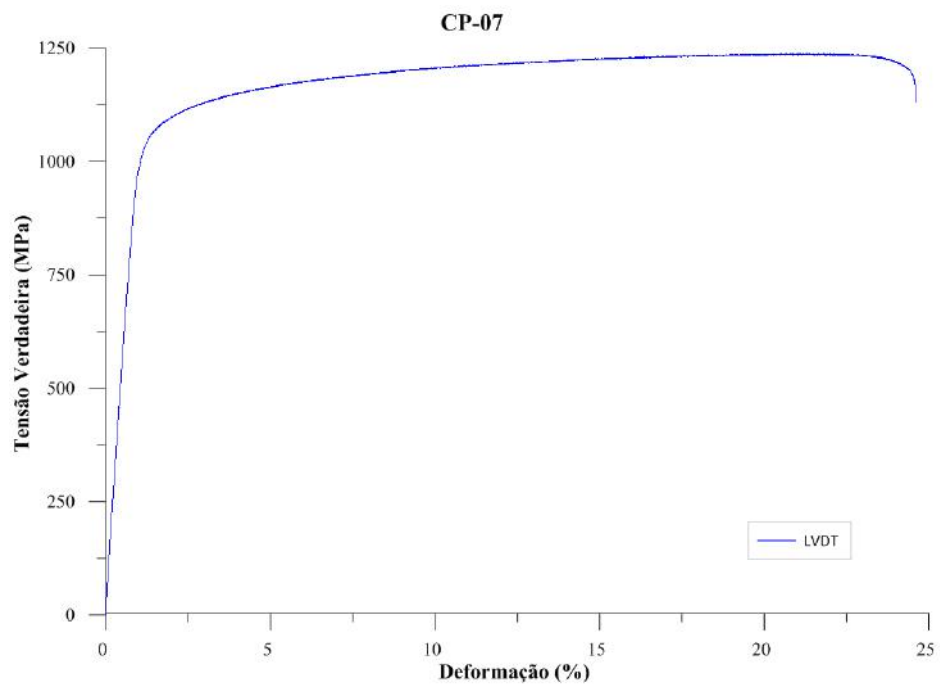


Gráfico 7: Curva tensão-deformação do CP-07.

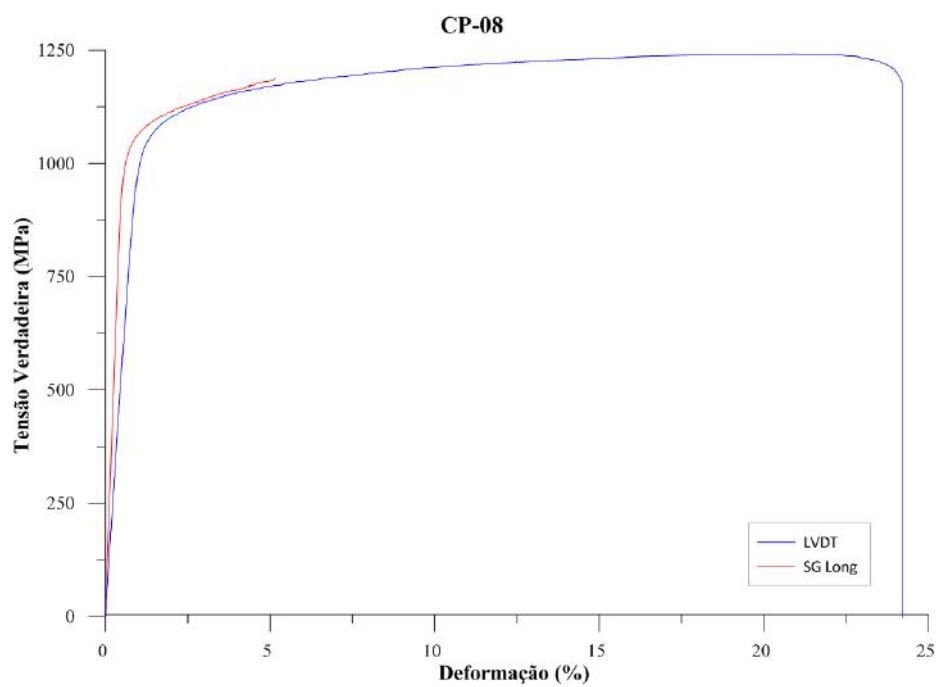


Gráfico 8: Curva tensão-deformação do CP-08.

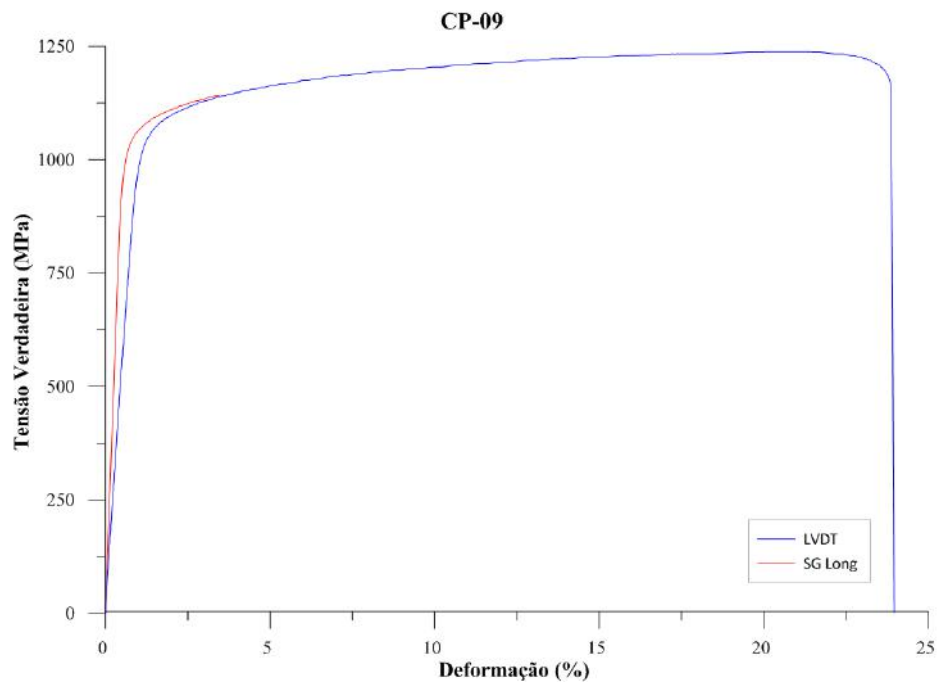


Gráfico 9: Curva tensão-deformação do CP-09.

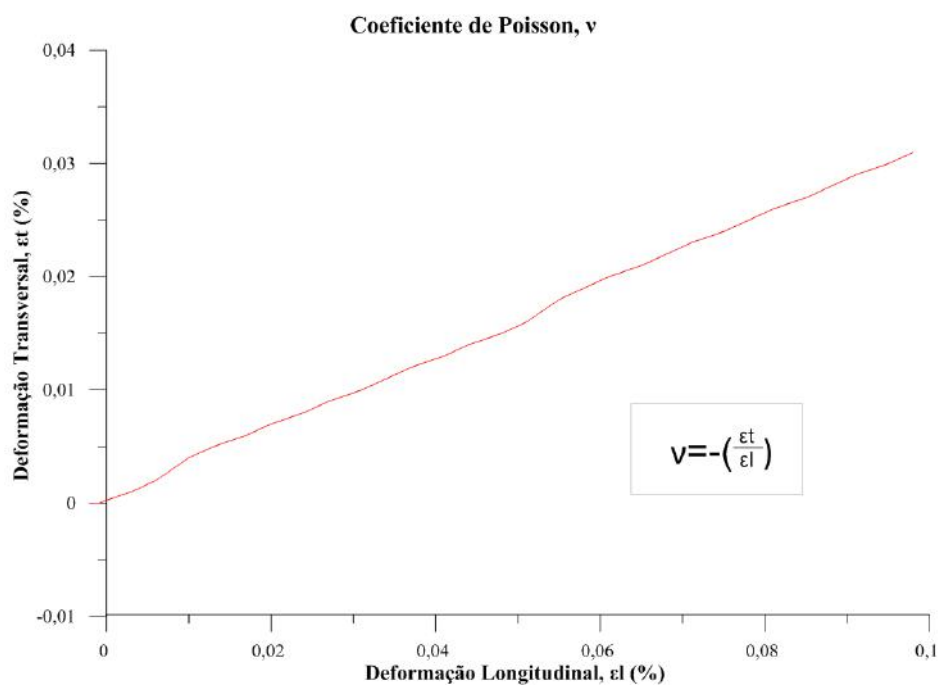


Gráfico 10: Determinação do coeficiente de Poisson – Inconel 625.

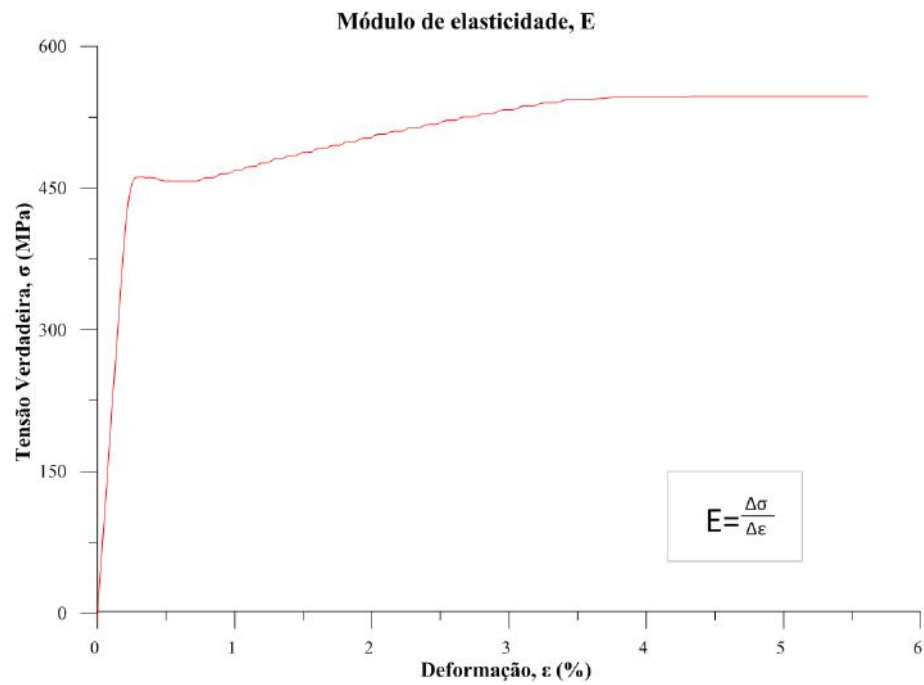


Gráfico 11: Determinação do módulo de elasticidade do material – Inconel 625.

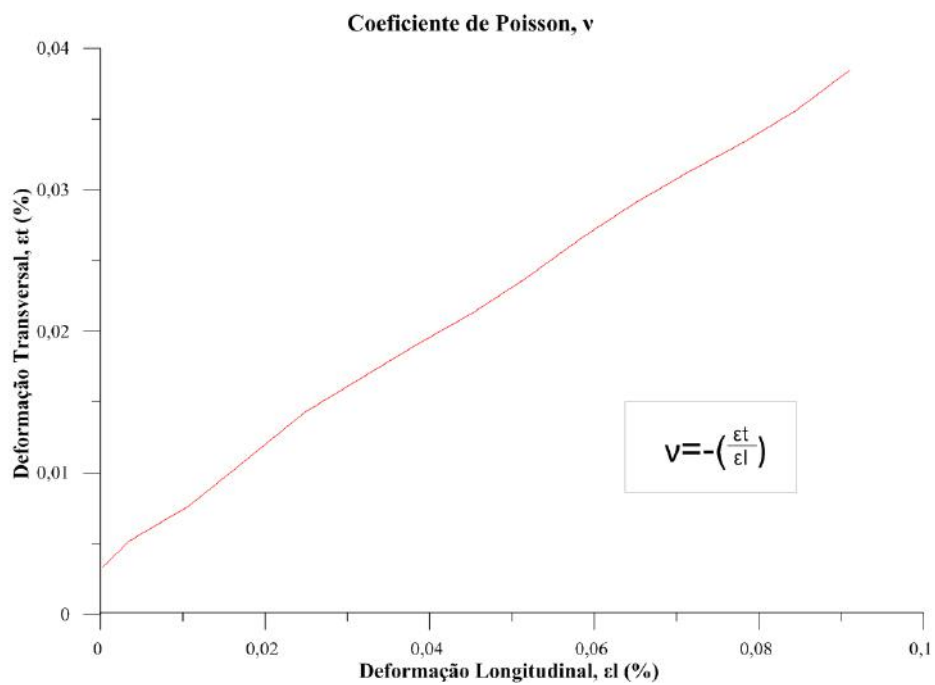


Gráfico 12: Determinação do coeficiente de Poisson – Inconel 718.

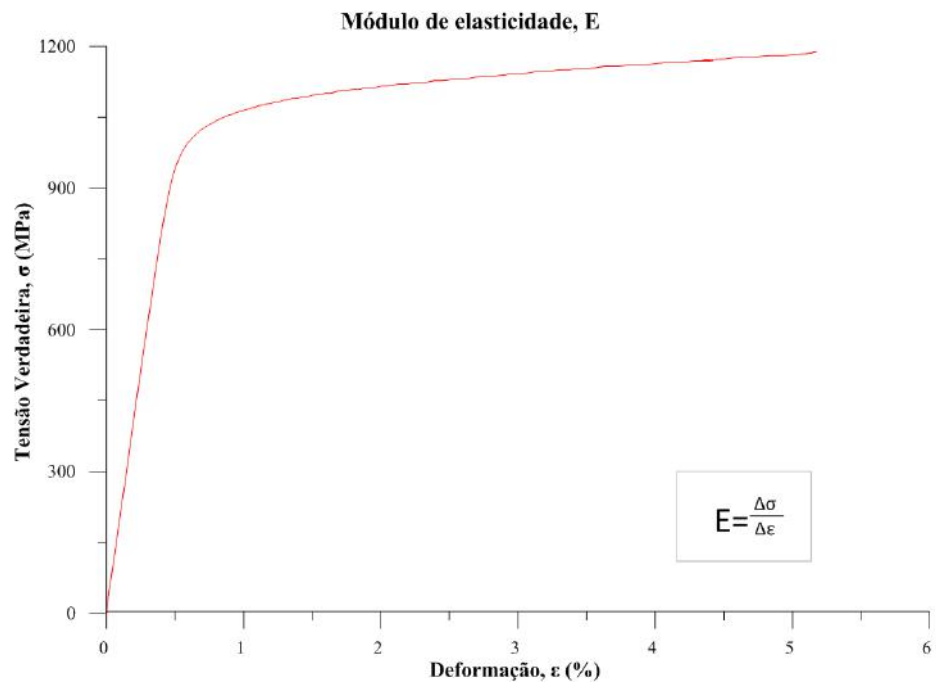


Gráfico 13: Determinação do módulo de elasticidade do material – Inconel 718.

## ANEXO II – Ensaios cíclicos

Os Gráficos de 14 a 18 são referentes aos ensaios realizados com o CP-04 instrumentado com os adesivos P250 e Loctite 401.

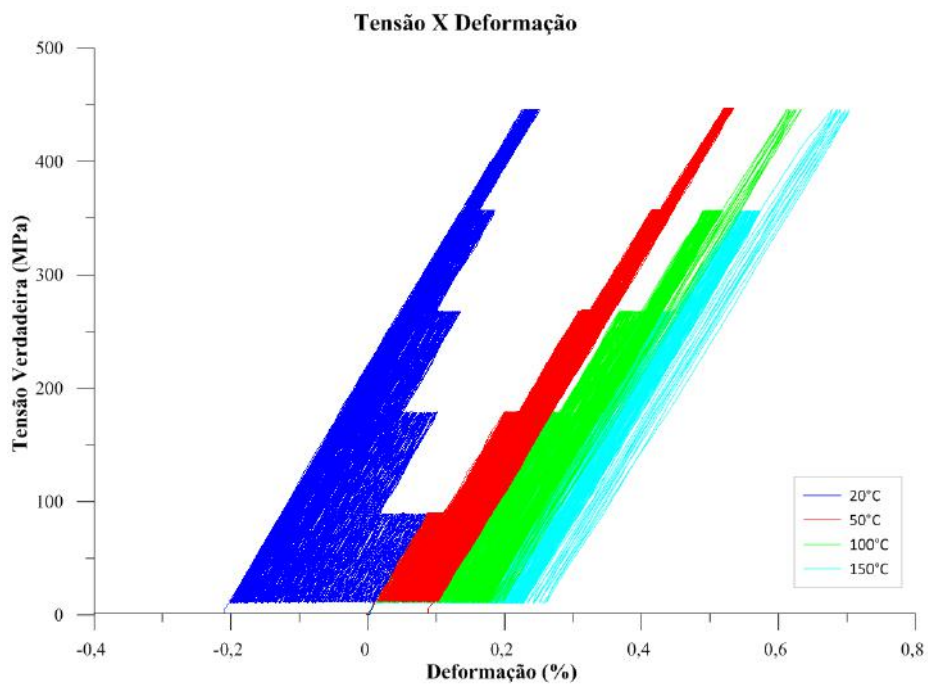


Gráfico 14: Resultados experimentais do CP-04 – P250 + Loctite 401.

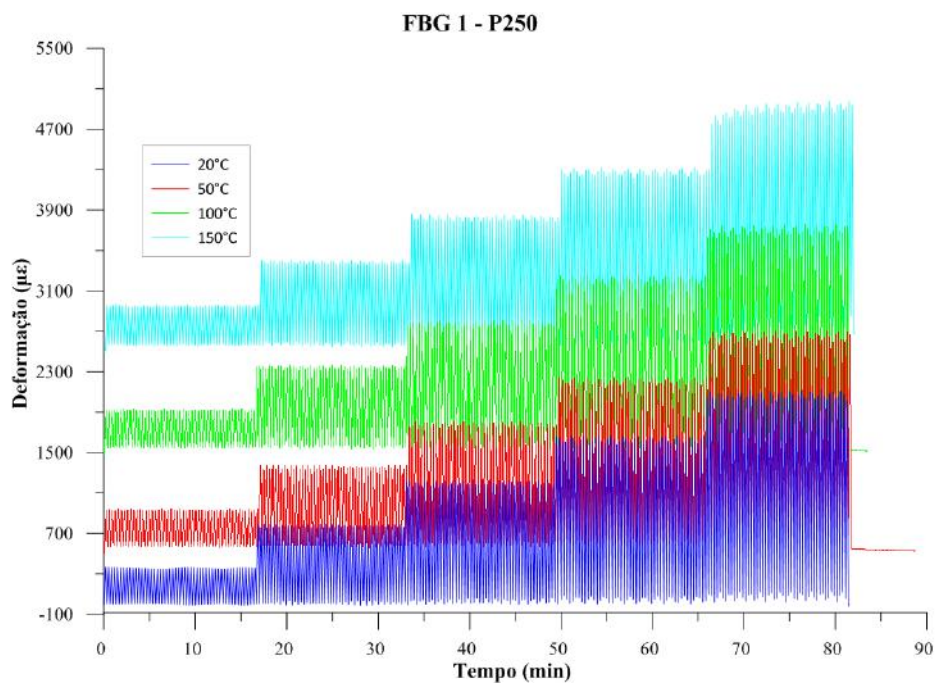


Gráfico 15: Resultados experimentais da FBG1 – P250.

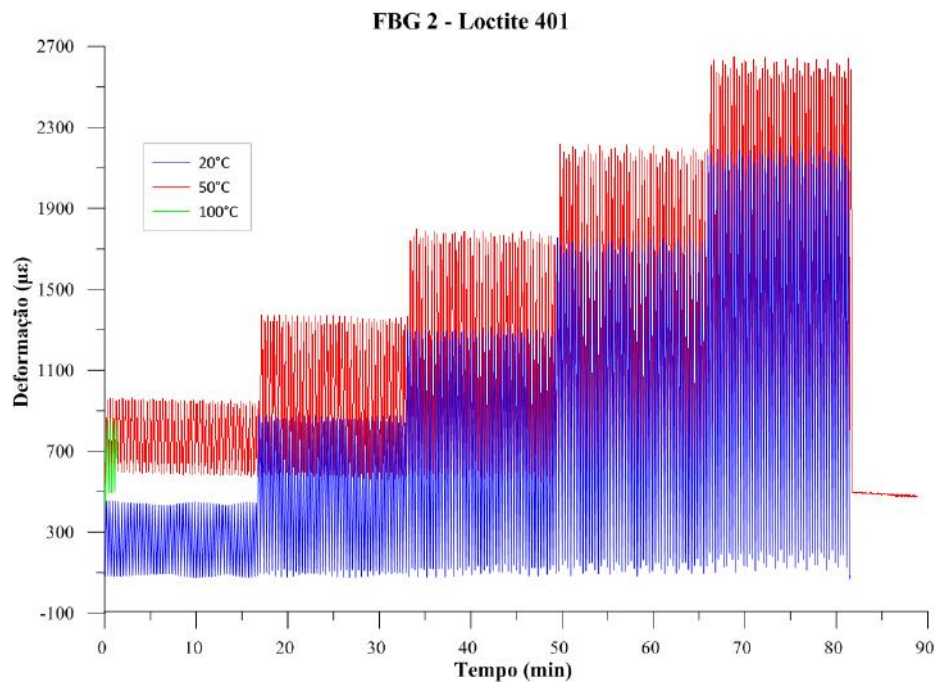


Gráfico 16: Resultados experimentais da FBG2 – Loctite 401.

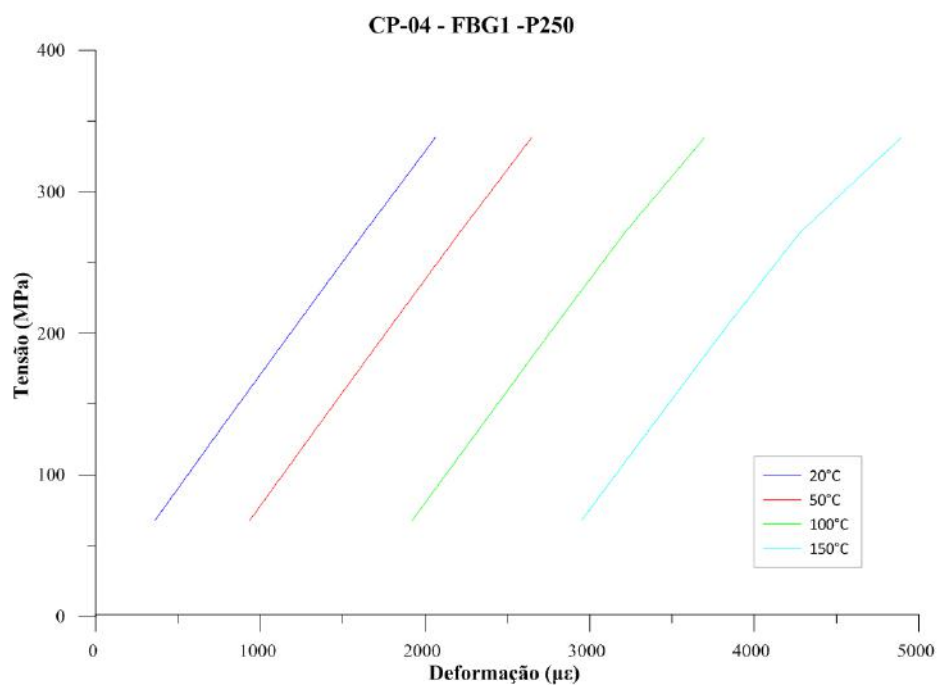


Gráfico 17: Correlação dos dados experimentais da FBG1 – P250.

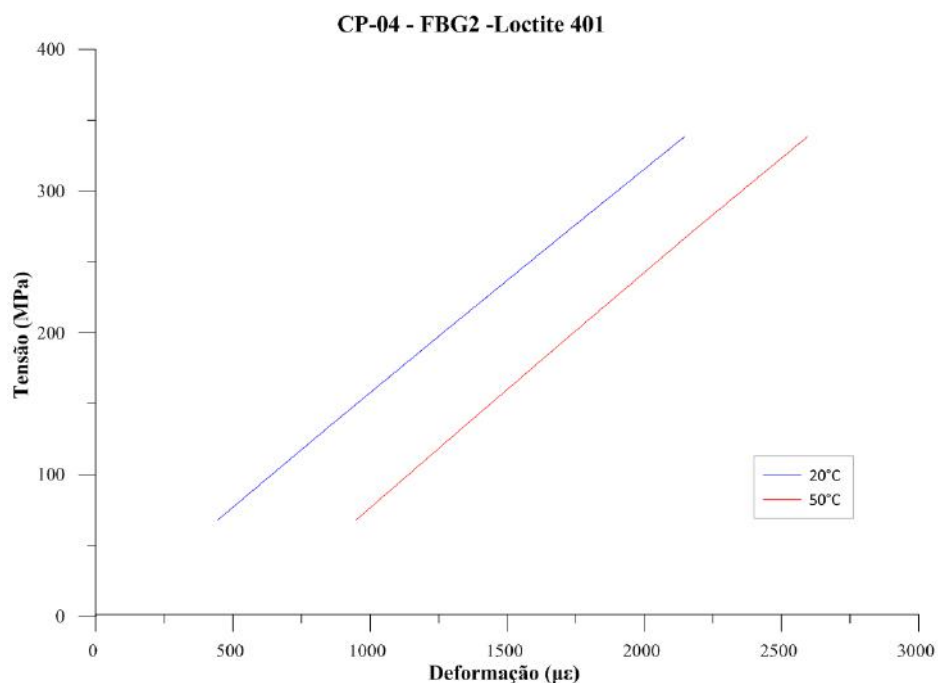


Gráfico 18: Correlação dos dados experimentais da FBG2 – Loctite 401.

Os Gráficos de 19 a 24 são referentes aos ensaios realizados com o CP-05 instrumentado com os adesivos Loctite 4090 e P250.

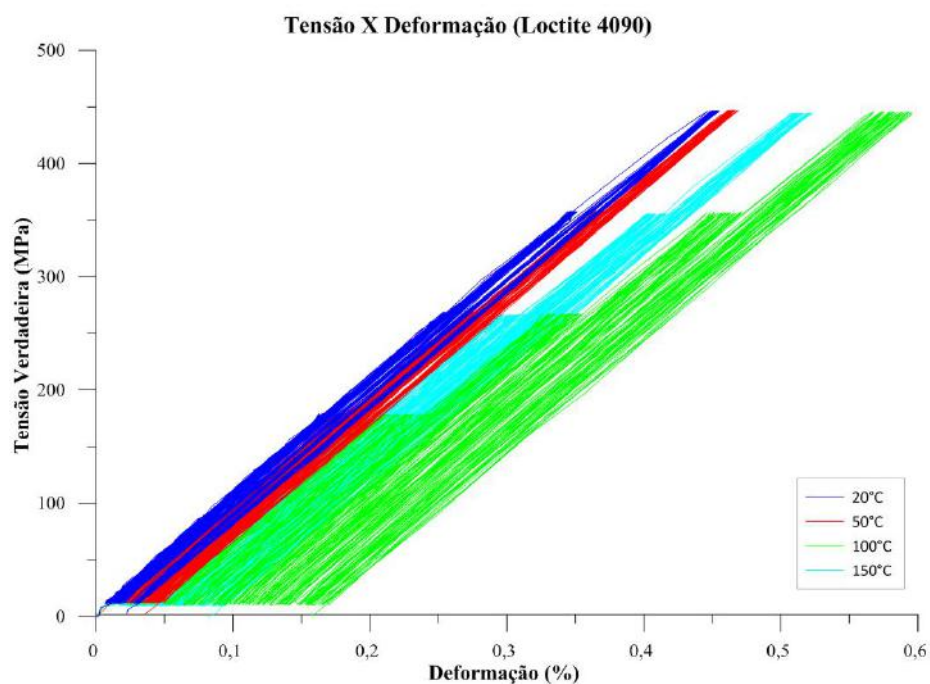


Gráfico 19: Resultados experimentais do CP-05 – Loctite 4090.

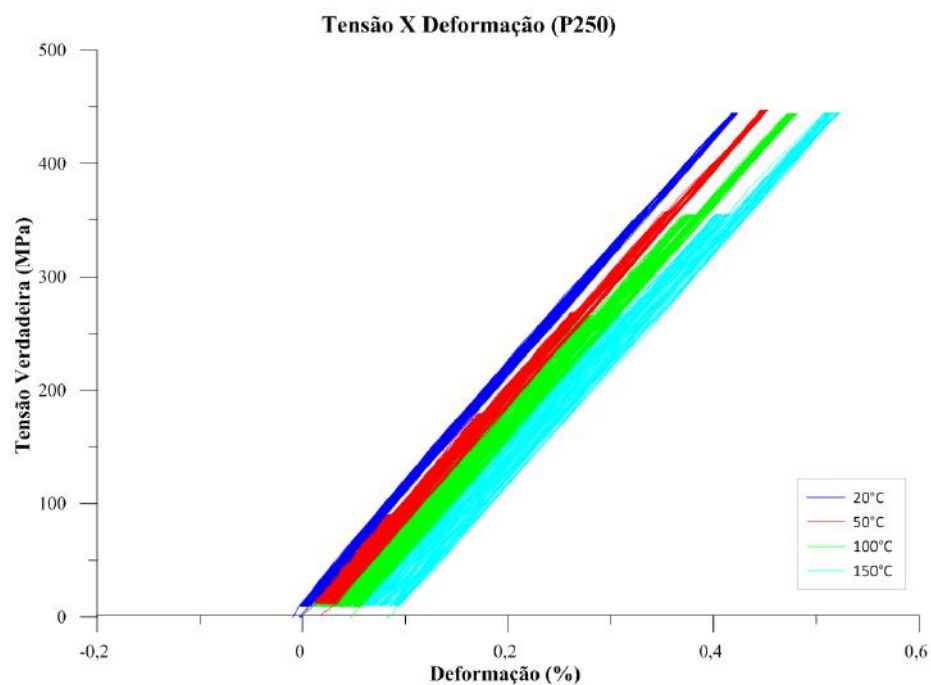


Gráfico 20: Resultados experimentais do CP-05 – P250.

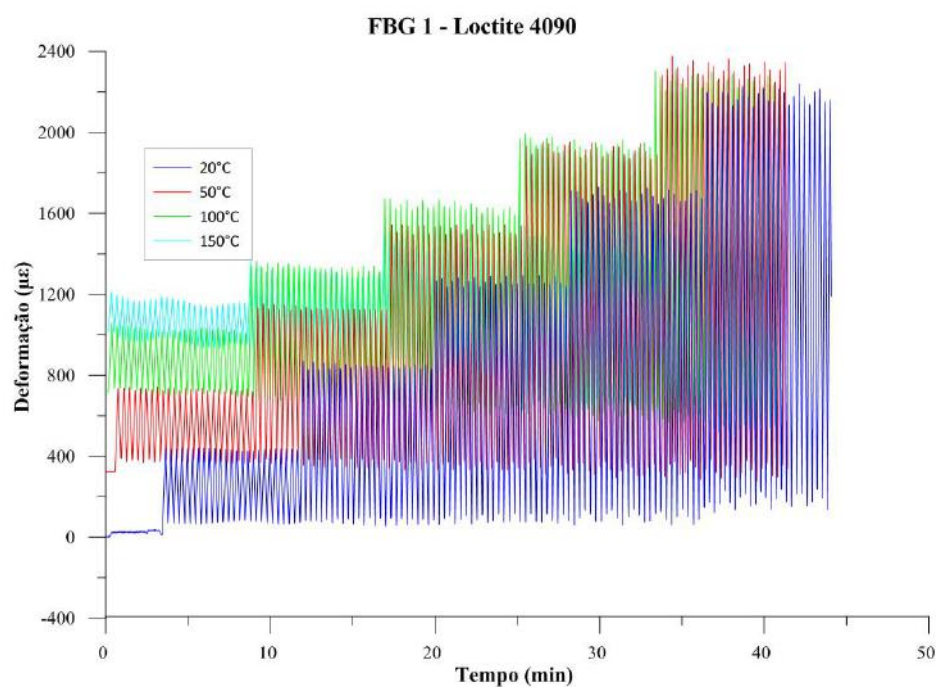


Gráfico 21: Resultados experimentais da FBG1 – Loctite 4090.



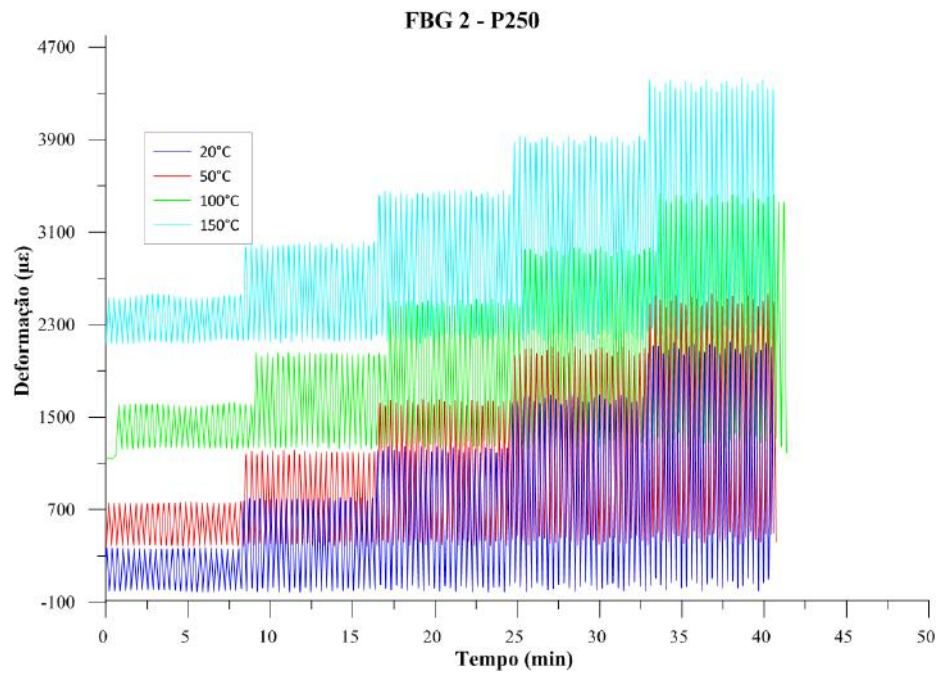


Gráfico 22: Resultados experimentais da FBG2 – P250.

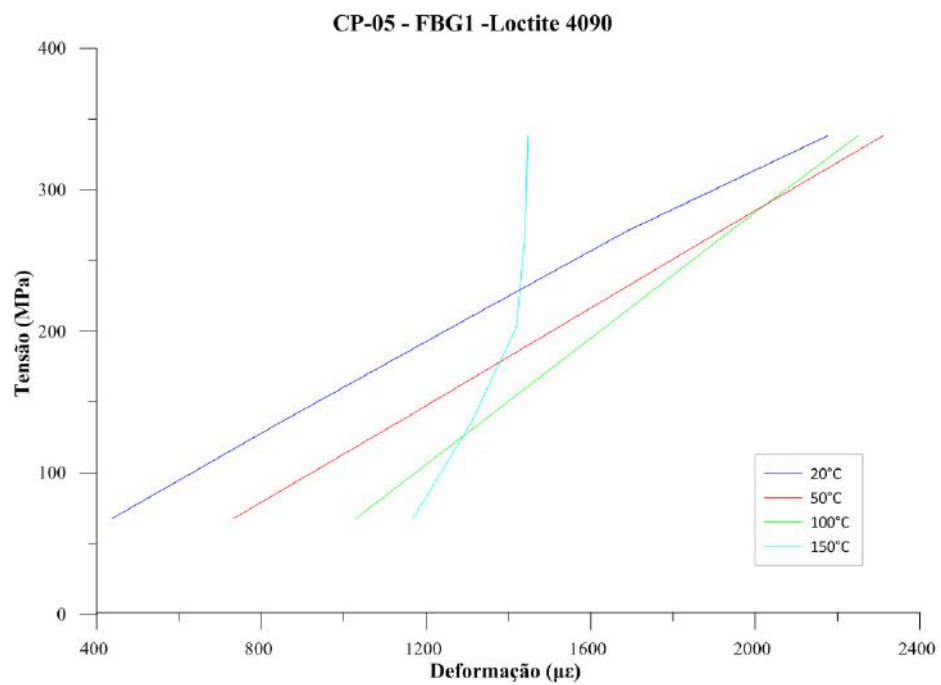


Gráfico 23: Correlação dos dados experimentais da FBG1 – Loctite 4090.

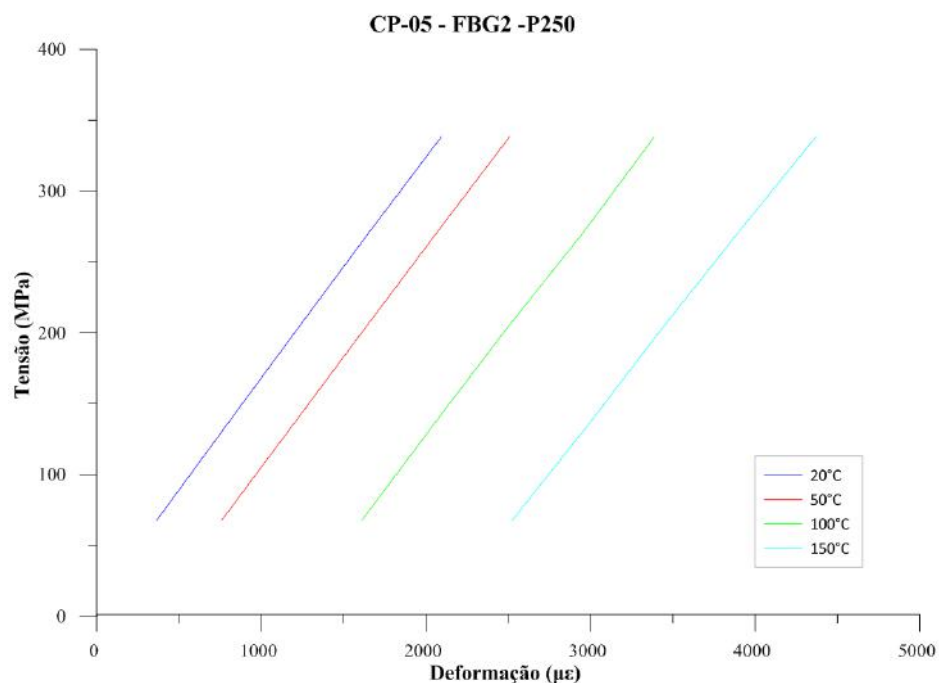


Gráfico 24: Correlação dos dados experimentais da FBG2 – P250.

Os Gráficos de 25 a 29 são referentes aos ensaios realizados com o CP-04 instrumentado com os adesivos P250 e M-Bond 610.

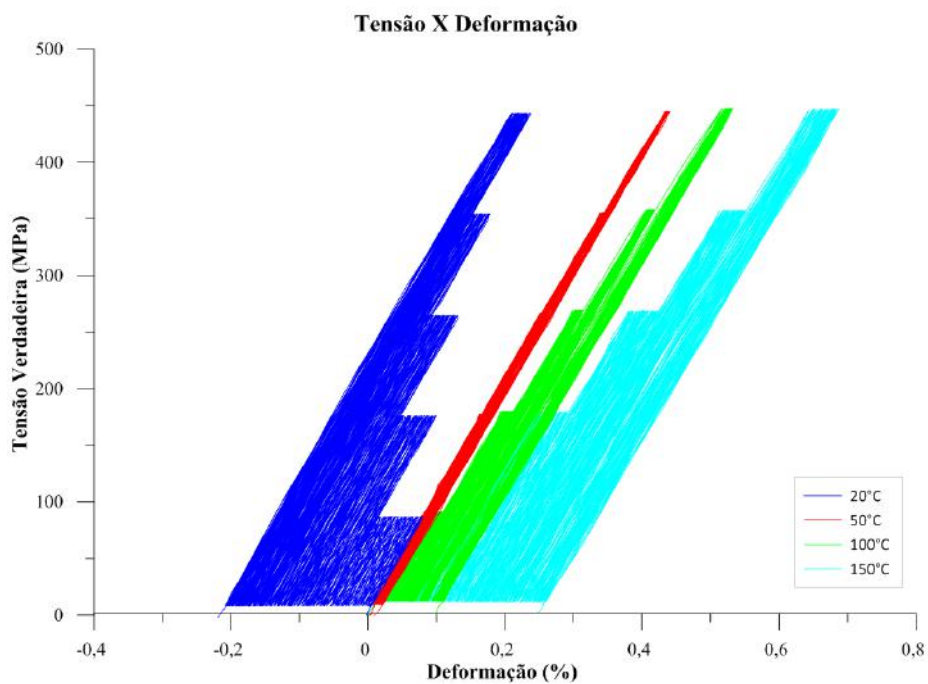


Gráfico 25: Resultados experimentais do CP-04 – P250 + M-Bond 610.

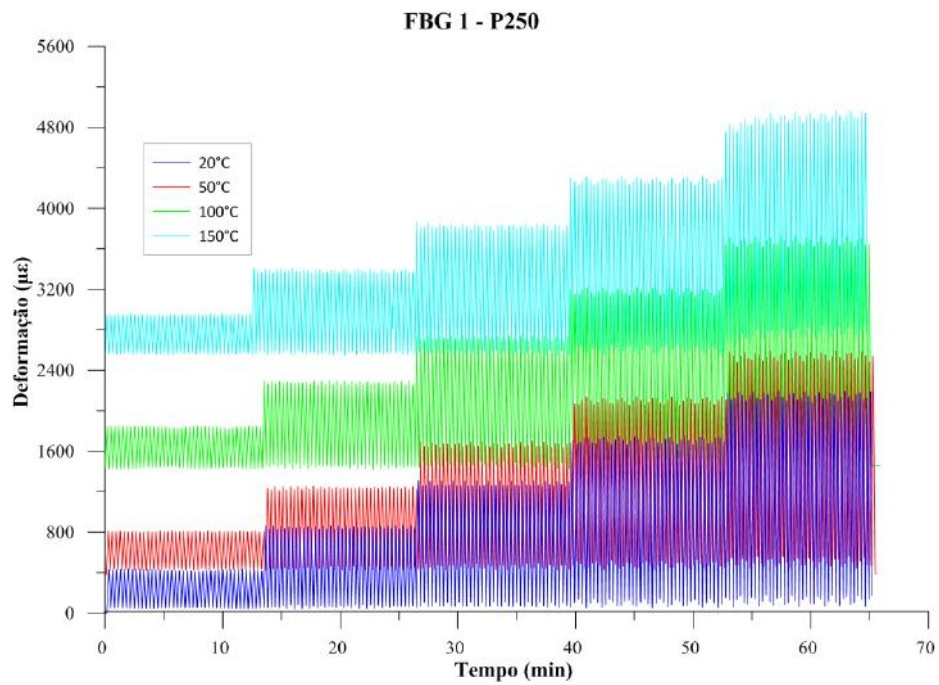


Gráfico 26: Resultados experimentais da FBG1 – P250.

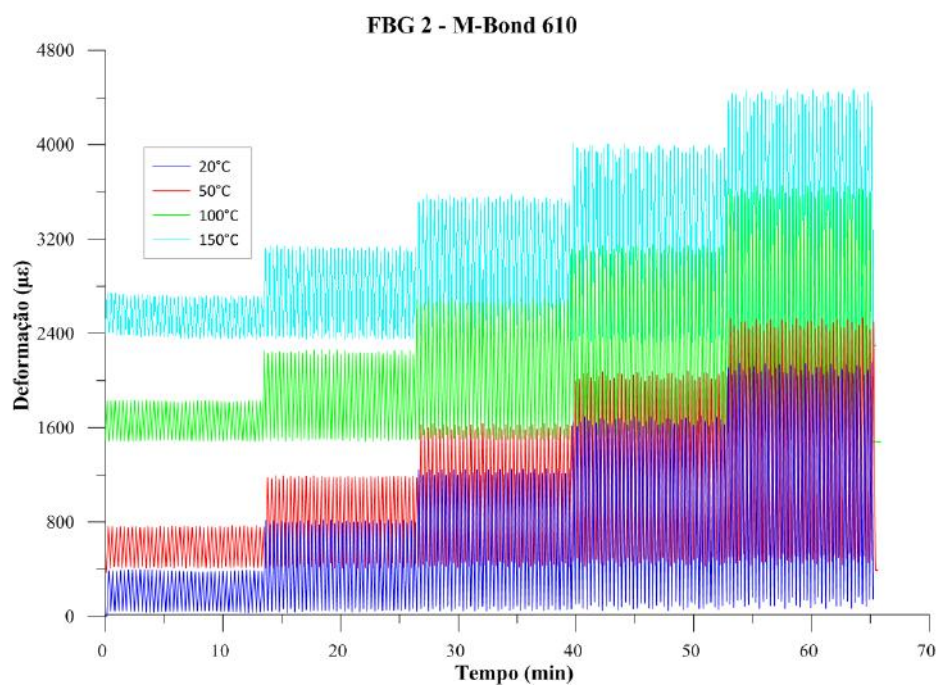


Gráfico 27: Resultados experimentais da FBG2 – M-Bond 610.

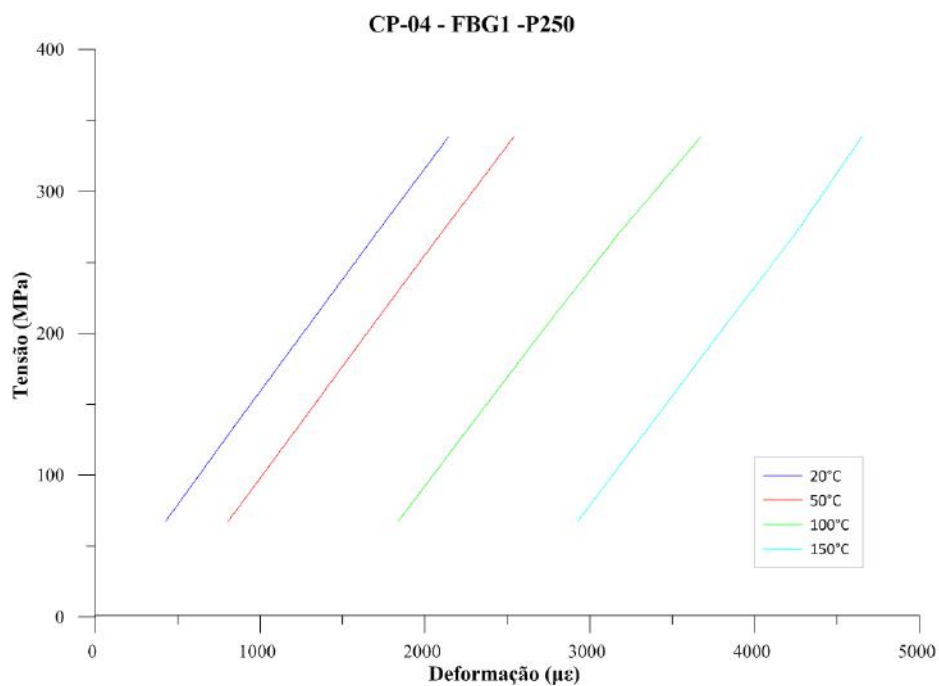


Gráfico 28: Correlação dos dados experimentais da FBG1 – P250.

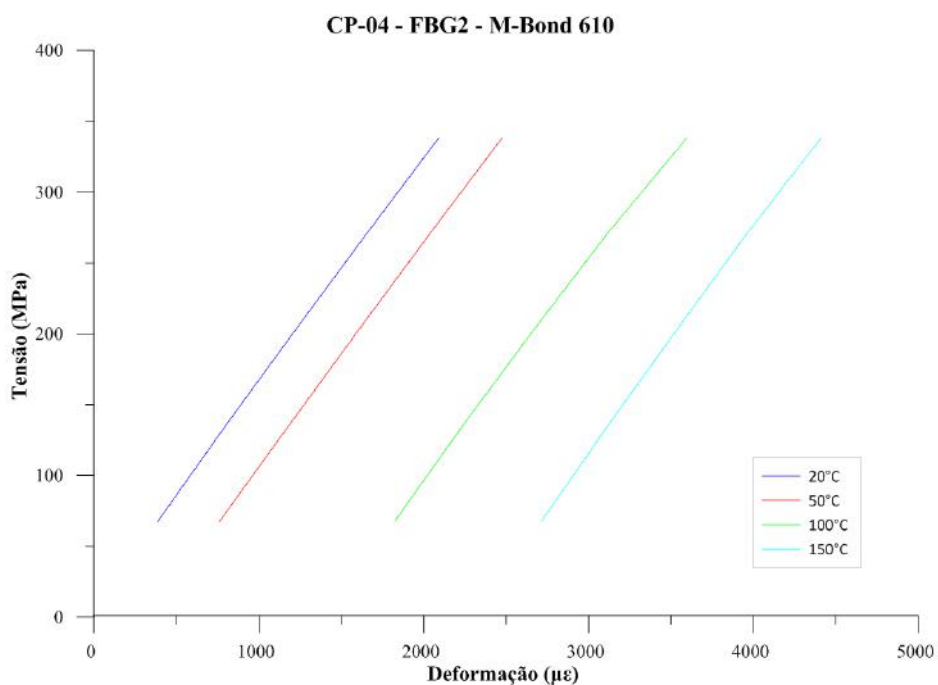


Gráfico 29: Correlação dos dados experimentais da FBG2 – M-Bond 610.

Os Gráficos de 30 a 33 apresentam a correlação entre a tensão aplicada e a deformação observada na FBG para cada nível de temperatura.

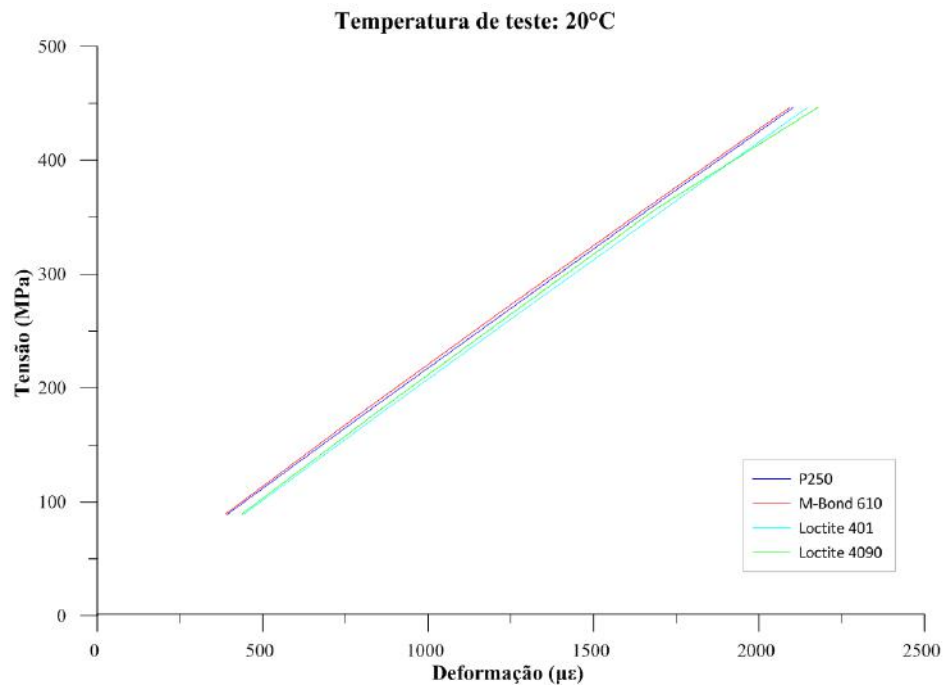


Gráfico 30: Correlação dos dados experimentais a temperatura de 20 °C.

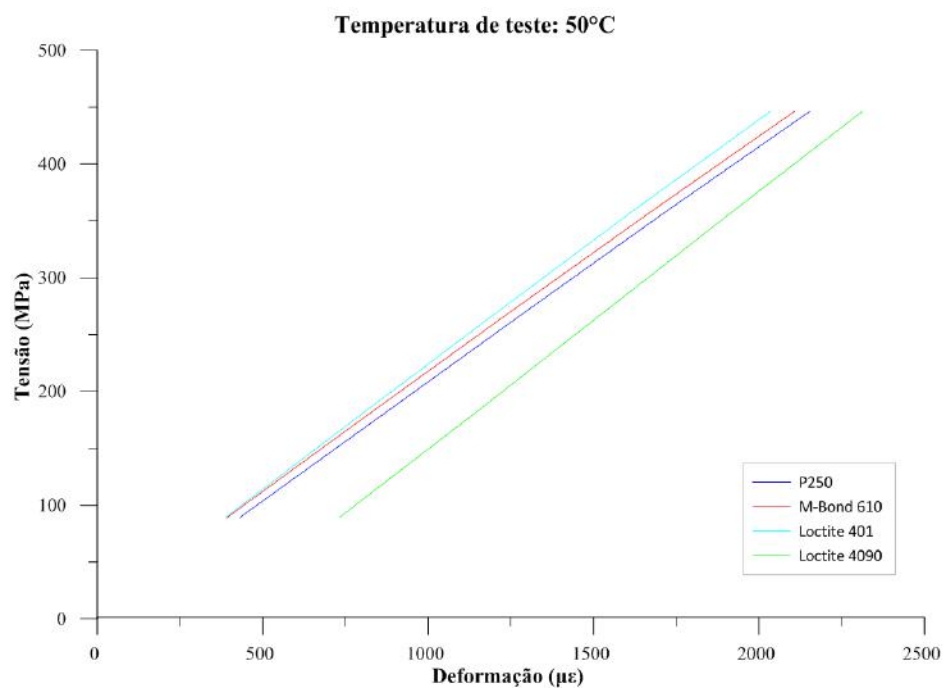


Gráfico 31: Correlação dos dados experimentais a temperatura de 50 °C.

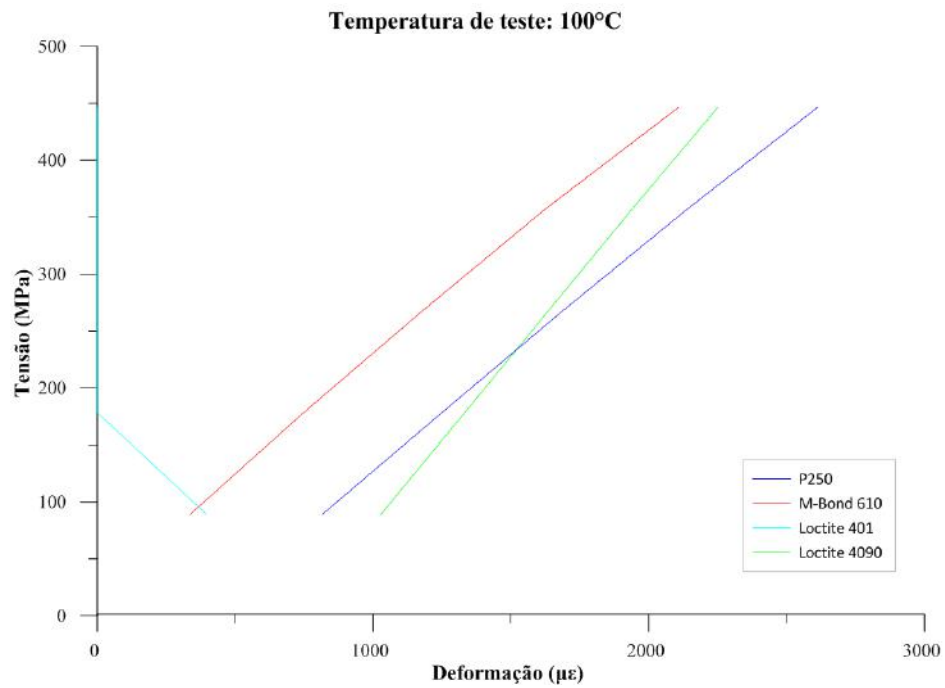


Gráfico 32: Correlação dos dados experimentais a temperatura de 100 °C.

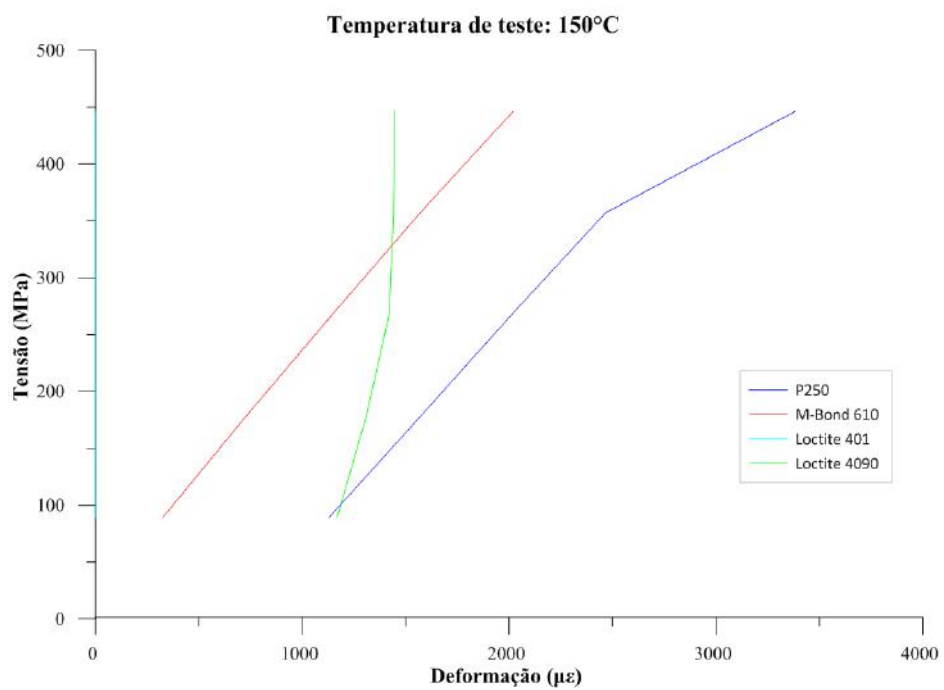


Gráfico 33: Correlação dos dados experimentais a temperatura de 150 °C.



## ANEXO III – Resultados do Modelo de Elementos Finitos

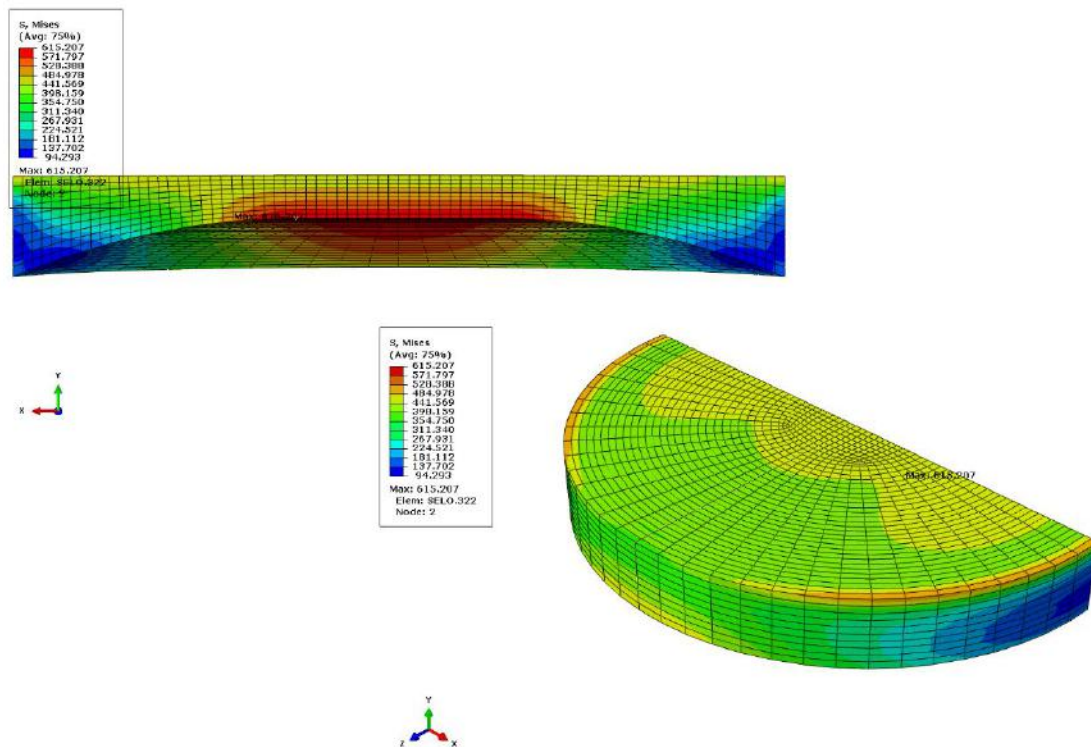


Figura 20: Resultados do carregamento de temperatura em termos de tensões de Mises resultantes (em MPa).

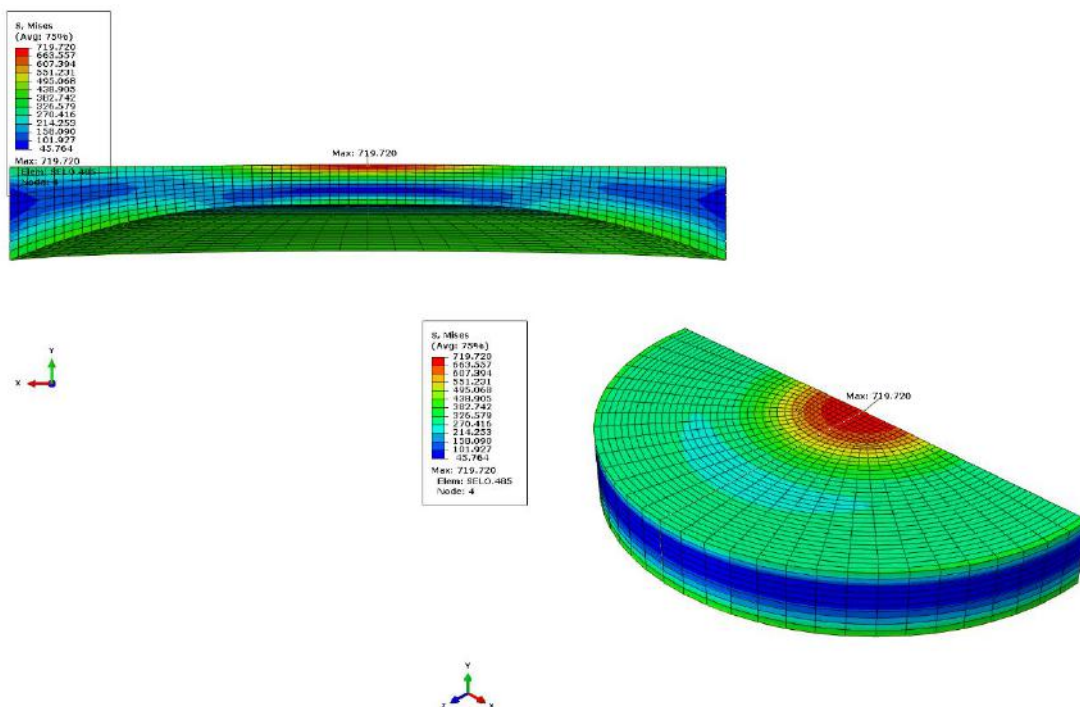


Figura 21: Resultados do carregamento de pressão em termos de tensões de Mises resultantes (em MPa).

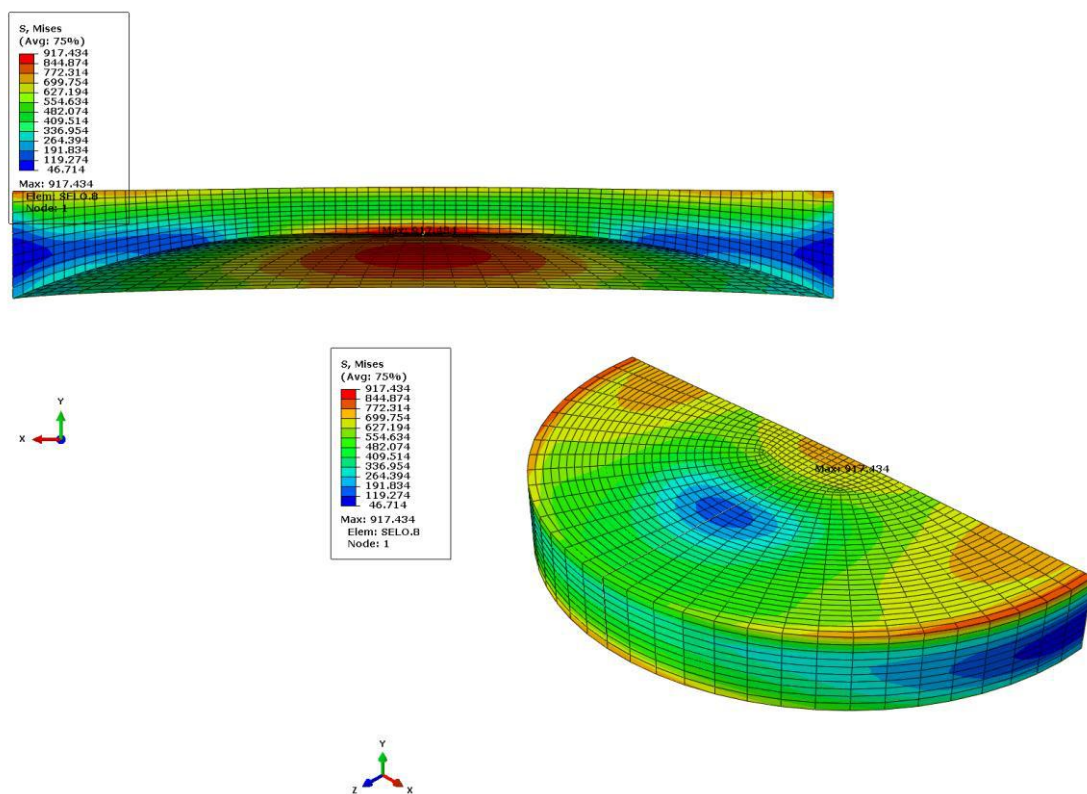


Figura 22: Resultados para o carregamento de temperatura e pressão em termos de tensões de Mises resultantes (em MPa).

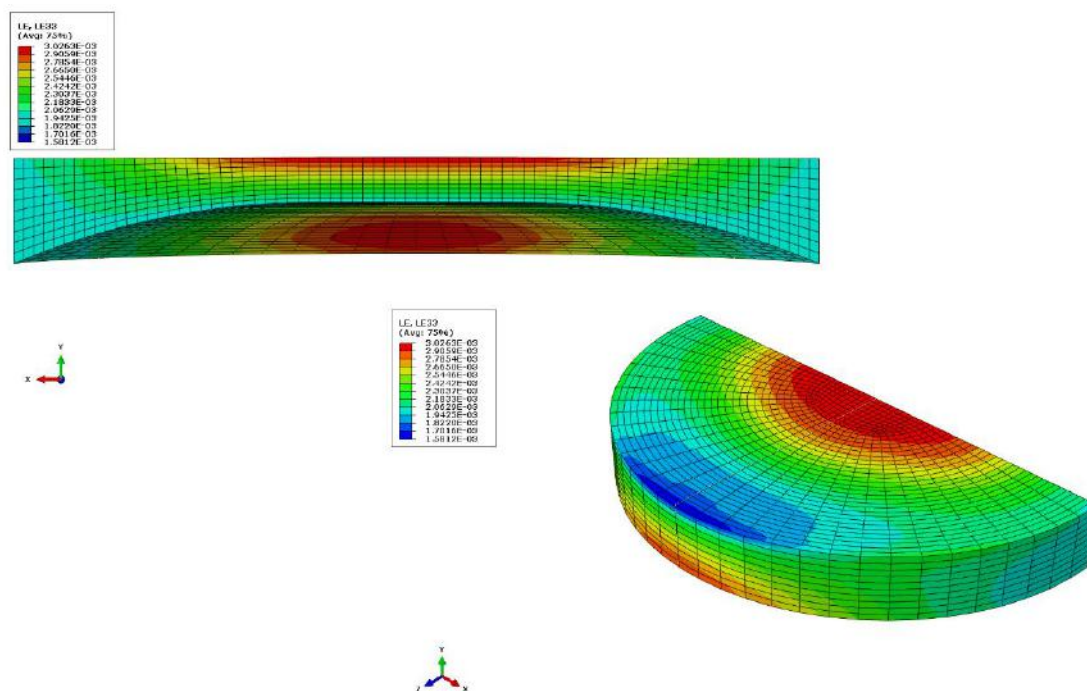


Figura 23: Resultados para o carregamento de temperatura em termos de deformações logarítmicas totais (LE33).



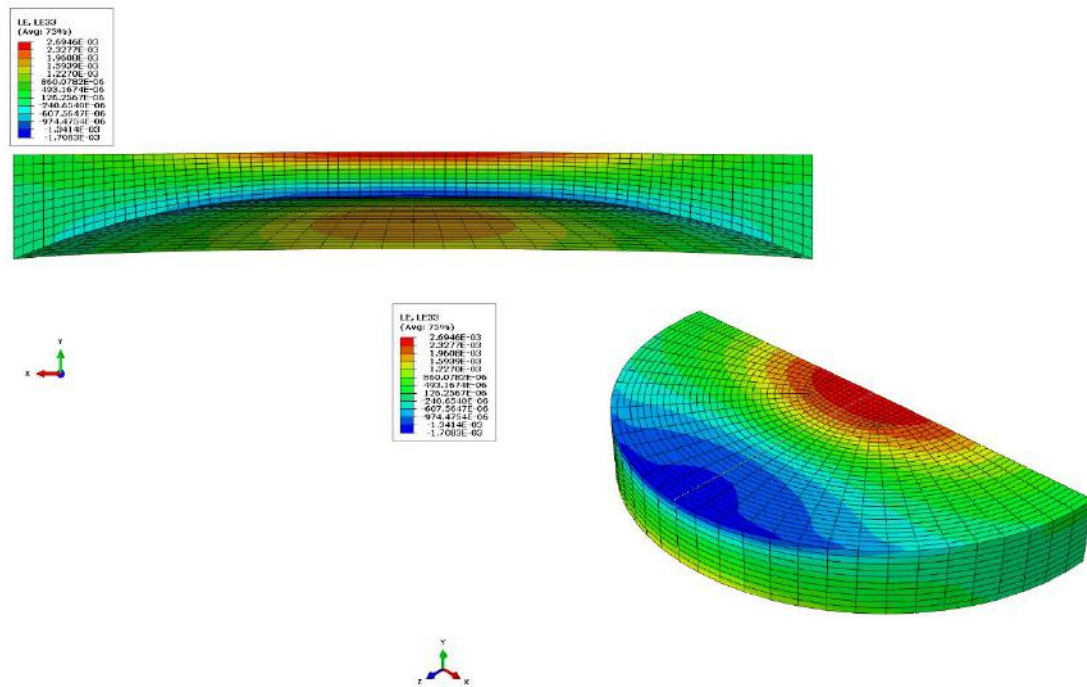


Figura 24: Resultados para o carregamento de pressão em termos de deformações logarítmicas totais (LE33).

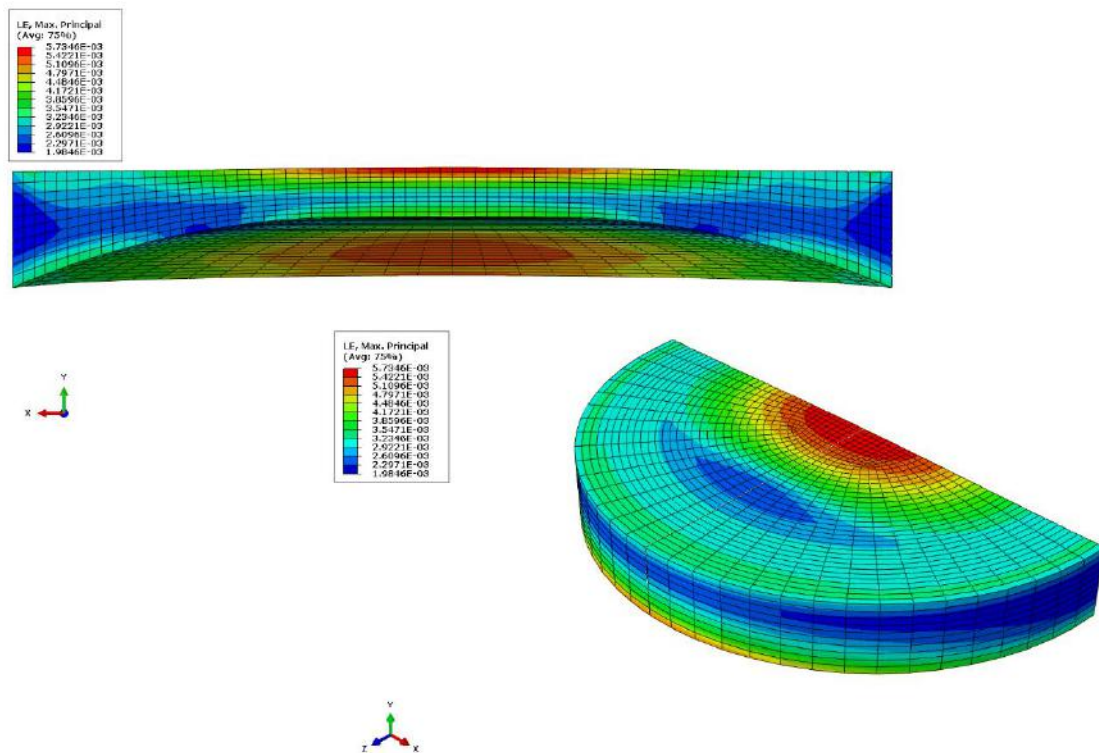


Figura 25: Resultados para o carregamento de temperatura e pressão em termos de deformações logarítmicas totais (LE33).